



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIKKO PARTANEN

TOIMINNALLISEN PALOMITOITUKSEN HYÖDYNTÄMINEN YRITYKSEN OMAISUUSVAHINKORISKIN ARVIOINNISSA

Diplomityö

Tarkastajat: prof. Markku Heinisuo,
DI Aleksi Ojala
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
5. maaliskuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

PARTANEN, MIKKO: Toiminnallisen palomitoituksen hyödyntäminen yrityksen omaisuusvahinkoriskin arvioinnissa

Diplomityö, 100 sivua, 2 liitesivua

Lokakuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: professori Markku Heinisuo, diplomi-insinööri Aleksi Ojala

Avainsanat: Toiminnallinen palomitoitus, kvantitatiivinen riskianalyysi. FDS, tapahtumapuu, vika- ja tapahtumapuutarkastelu

Toiminnalliseen palotekniseen suunnitteluun liittyvät tarkastelut ovat yleistyneet laskentaohjelmien kehityksen myötä vuosien saatossa. Tässä työssä tuodaan teoreettisesti esille toiminnallisen palomitoituksen kulkua ja kuinka toiminnallista tarkastelua sovelletaan vertailevaan riskitarkasteluun.

Tutkimuksen teoreettisessa viitekehyksessä käydään läpi toiminnallista palomitoitusta ja siihen liittyvää prosessia suunnittelutyön aikana. Lisäksi esitellään toiminnallisen tarkastelun työkaluja ja laskentamenetelmiä, jotka ovat käytössä toiminnallisessa paloteknisessä suunnittelussa. Teoriaosuudessa käsiteltyjä asioita sovelletaan paloriskitarkasteluun. Case -tarkastelun kohteena on tehdasrakennuksen yhteydessä oleva varastotila, missä tutkitaan eri toteutusvaihtoehtoja alentaa vuosittaista rahallisen vahingon odotusarvoa. Tutkimus on luonteeltaan vertaileva; jokaiselle toteutusvaihtoehdolle määritetään vika- ja tapahtumapuutarkasteluin paloskenaarioiden todennäköisyydet. Pieni osa skenaarioista simuloidaan FDS (Fire Dynamics Simulator) palosimulointiohjelmalla. Näiden tulosten perusteella voidaan arvioida omaisuusvahinkokustannusten toteutuminen (seuraukset) lopuissa skenaarioissa. Lopulta skenaariokohtaisista todennäköisyyksistä ja seurauksista muodostetaan kokonaisriski. Kokonaisriskin suuruutta toteutusvaihtoehtojen välillä arvioidaan riskisuhdelukujen avulla.

Saatujen tulosten perusteella työssä käytetty toimintatapa osoittautui käytännölliseksi menetelmäksi vertailla ja arvioida kvantitatiivisesti turvallisuustoimintojen vaikutusta tilakohtaiseen vuosittaiseen palorisktiin. Menetelmä soveltuu tapauksiin, joissa kohteen lähtötiedot ovat hyvin selvillä ja ongelma on tarkasti rajattu. Riskitarkastelu on hyödyllisin juuri vertailevana analyysinä, jolloin lähtöarvojen epävarmuudella ei ole suurta vaikutusta tuloksiin skenaariokokonaisuuksien yhteismitallisessa tarkastelussa. Yksittäisenä rahallisen vahingon odotusarvona menetelmää on kuitenkin syytä käyttää äärimäisen varoen, koska oletuksia ja epävarmuustekijöitä on paljon. Tulosten käsittelyssä ilmenee myös selkeästi toiminnallisen tarkastelun kohdekohtaisuus; yksittäisestä tarkastelusta saatuja tuloksia ei saa yleistää pätemään muihin samankaltaisiin tapauksiin.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

PARTANEN, MIKKO: The Application of Performance-based Fire Safety Design in Company's Fire Risk Assessment

Master of Science Thesis, 100 pages, 2 Appendix pages

October 2014

Major: Structural Design

Examiners: Professor Markku Heinisuo, M.Sc. Aleksi Ojala

Keywords: Performance-based fire safety design, quantitative fire risk assessment, Fire Dynamics Simulator, event tree, fault tree

The performance-based approach has become more common nowadays in fire safety design as calculation software have developed fast during past few decades. In this study the progress of the performance-based fire safety design will be introduced and how this approach is applied to a comparative risk assessment.

In the theoretical chapters the performance-based approach is presented in general and how the design process continues from starting point to final documentation. Furthermore, some techniques of reliability analysis and methods of modeling enclosure fires used in the performance-based fire safety design are shown. The matters that are dealt with in the theory chapters are adapted to a fire risk analysis. The research method is a case study related to a storage space connected to a production plant. The goal is to calculate the annual expected property risk in the case of the storage fire and study different alternatives to decrease the total fire risk. At First fault and event tree analysis are exploited to calculate probabilities of each fire scenario in design alternatives. Five fire scenarios are simulated using the field model software FDS (Fire Dynamics Simulator) in order to estimate realization of property losses (the consequences) in all other scenarios. The risk is formed by multiplying probabilities and consequences in each scenario. The risk ratio is used to estimate the size of the total risk between the design alternatives.

On the basis of the results obtained at this study the way of action turned out to be practical to compare and to estimate quantitatively the effect of safety systems on the space-specific annual fire risk. The method is suitable for cases in which the initial information of the space is well known and the problem is strictly limited. The risk assessment is the most useful method as a comparative analysis, in which case the uncertainty of the predetermined values does not have so great impact on the results in the commensurable examination of the design alternatives. However, the method must be used carefully as an individual expectation value of the pecuniary damage because the examination includes many assumptions and factors of uncertainty. The individuality of the performance-based design is also observed during the case study; the obtained results of risk analysis must not generalize to relate other similar cases.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle. Rahoittajina olivat Pöyry Finland Oy sekä työn loppuvaiheessa tapahtuneen yrityskaupan myötä myös Ramboll Finland Oy. Työn tarkastajina toimivat professori Markku Heinisuo ja diplomi-insinööri Aleksi Ojala.

Haluan osoittaa erityiskiitokseni Aleksille, joka kehitti aiheen ja toimi suurena apuna työn edistymisen aikana. Lisäksi kiitokset kuuluvat Markku Heinisuoille työn ohjauksesta ja sujuvasta yhteistyöstä sekä osastopäällikkö Timo Salmelle, joka mahdollisti diplomityön tekemisen edellä mainituissa yrityksissä.

Tampereella 29.8.2014

Mikko Partanen

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta, tavoitteet ja menetelmät	1
1.2	Tutkimuksen rakenne ja rajoitukset.....	2
2	Toiminnallinen palomitoitus.....	4
2.1	Lainsäädäntö	4
2.2	Oleellinen vaatimus ja vaatimuksen täyttymisen osoittaminen	5
2.3	Toiminnallisen palomitoituksen prosessi	6
2.3.1	Projektin soveltamisala	7
2.3.2	Turvallisuusvaatimukset	7
2.3.3	Turvallisuustavoitteet	9
2.3.4	Hyväksymiskriteerit.....	9
2.3.5	Uhkakuvat ja mitoituspaloskenaariot	11
2.3.6	Suunnitteluratkaisut	19
2.3.7	Esitietodokumentti.....	21
2.3.8	Suunnitteluratkaisujen kelpoisuus ja lopullisen suunnitteluratkaisu 21	
2.3.9	Dokumentointi	28
3	Toiminnallisen tarkastelun työkalut ja laskentamenetelmät.....	30
3.1	Todennäköisyysanalyysin työkalut.....	30
3.1.1	Vikapuuanalyysi	30
3.1.2	Tapahtumapuuanalyysi	33
3.2	Seurausanalyysin laskentamenetelmät.....	34
3.2.1	Yksinkertaiset laskentamallit.....	35
3.2.2	Vyöhykemallit	37
3.2.3	Kenttämallit	39
3.2.4	Poistumismallit	41
4	Case -tapaus	47
4.1	Tarkastelun lähtökohdat.....	47
4.2	Nykyinen varastotila	47
4.2.1	Geometria ja rajaavat rakenteet	47
4.2.2	Ovet ja aukot.....	48
4.2.3	Aktiivinen palontorjunta	49
4.2.4	Savunpoisto.....	49
4.2.5	Palokuorma	49
4.3	Tarkasteltavat skenaariokokonaisuudet	49
4.4	Tapaustutkimuksen eteneminen.....	50
5	Todennäköisyyksien määrittelyn periaatteet	52
5.1	Palon syttyminen	52
5.1.1	Potentiaaliset syttymislähteet.....	52

5.1.2	Syttymisen todennäköisyys	52
5.2	Turvallisuustoiminnot	53
5.2.1	Paloilmoitinjärjestelmä	53
5.2.2	Alkusammutus	54
5.2.3	Automaattinen sammutusjärjestelmä (sprinkleri)	56
5.2.4	Palo-osastointi	56
5.2.5	Palokunnan sammutustyö	57
5.3	Ratkaisuvaihtoehtojen tapahtumapuut	59
5.4	Simuloitavat paloskenaariot	60
6	Palosimulointimalli	62
6.1	Ohjelmisto	62
6.2	Geometria ja rakenteet	62
6.3	Hilaverkko	64
6.4	Paloturvallisuusjärjestelmät	65
6.5	Mitoituspalo	66
6.5.1	Alkupalo	66
6.5.2	Yksittäisen palopaketti	66
6.5.3	Varaston mitoituspalo	67
6.5.4	Sprinklerijärjestelmän vaikutus	68
6.6	Mittausparametrit	69
7	Seurausten arviointi	71
7.1	Arviointijako	71
7.2	Seurauskustannukset	71
7.3	Seurausluokitusten yhdistämiskriteerit	73
8	Palosimulointien tulokset	74
8.1	Alkusammutuksen onnistumisen todennäköisyys	74
8.1.1	Paloilmoitinjärjestelmä onnistuu	74
8.1.2	Paloilmoitinjärjestelmä epäonnistuu	74
8.2	Palokunnan sammutustyön onnistumisen todennäköisyys	74
8.2.1	Paloilmoitinjärjestelmä onnistuu	74
8.2.2	Paloilmoitinjärjestelmä epäonnistuu	75
8.3	Seuraukset	75
8.3.1	Savuvahingot	75
8.3.2	Palovahingot	79
8.3.3	Ympäristövahingot	81
8.3.4	Hilakoon herkkyytstarkastelu	84
9	Kokonaisriski	86
9.1	Skenaariokokonaisuuksien vahingon odotusarvo	86
9.1.1	SK1A: Nykyinen varastotila	86
9.1.2	SK1B: Nykyinen varastorakennus + sprinkleri	87
9.1.3	SK2A: Erillinen varastorakennus	88
9.1.4	SK2B: Erillinen varastorakennus + sprinkleri	88

9.2	Herkkyystarkastelu	89
9.2.1	Herkkyystarkastelu 1: Hilakoko 6,25 cm	89
9.2.2	Herkkyystarkastelu 2: Poikkeava palovahinkoseuraus	89
10	Johtopäätökset	91
10.1	Riskitarkastelun tulokset	91
10.2	Menetelmän käyttökelpoisuus	92
Lähteet	94
	Liite 1: Skenaariokokonaisuuksien tapahtumapuut	101

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AHJ	Authority Having Jurisdiction
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
ASET	Available Safe Egress Time
CFAST	Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
ELMAS	Event Logic Modeling and Analysis Software
FED	Fractional Effective Dose
FDS	Fire Dynamics Simulator
HRR	Heat Release Rate
INSTA	Inter Nordic Standardisation Cooperation
LES	Large Eddy Simulation
NIST	National Institute of Standards and Technology
NFPA	The National Fire Protection Association
RANS	Reynolds – Averaged Navier – Stokes
RSET	Required Safe Egress Time
SFPE	Society of Fire Protection Engineers

A_0	Aukon pinta-ala [m^2]
C	Seuraus
c	Ominaislämpökapasiteetti [$\text{kJ}/(\text{kg K})$]
c_p	Ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [$\text{kJ}/(\text{kg K})$]
D	Palon läpimitta [m], henkilötiheys [$\text{hlö}/\text{m}^2$]
D^*	Palon ominaisläpimitta [-]
g	Gravitaatiovakio [m/s^2]
E_g	Kaasun sisäinen energia [J]
F_s	Ominaishenkilövirta [$\text{hlö}/(\text{s} \cdot \text{m})$]
H_o	Aukon korkeus [m]
H_c	Täydellinen palamislämpö [kJ/kg]
k	Kineettinen energia [J], poistumisreitien ominaisuuksista riippuva kerroin [-], lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m K})$]
L	Uloskäytävän pituus [m]
L_f	Liekin korkeus [m]
m	Massa [kg]
\dot{m}_{fi}	Pyrolyysissa vapautuvan kaasun massan syntymisnopeus [kg/s]
\dot{m}_{in}	Huonetilaa sisään tulevan kaasun massavirta [kg/s]
\dot{m}_{out}	Huonetilasta ulos tulevan kaasun massavirta [kg/s]
N	Henkilöiden lukumäärä
\dot{Q}	Lämmönluovutusnopeus, paloteho [W]

\dot{Q}_{akt}	Paloteho sprinklerin aktivoitumishetkellä [kW]
\dot{Q}_c	Lämmönluovutusnopeuden kuljettumalla siirtyvä osa [W]
\dot{Q}_{in}	Aukkojen läpi sisään tulevien kaasujen lämmönsiirtymisnopeus [W]
\dot{Q}_{rad}	Aukkojen läpi säteilemällä poistuvan lämmön siirtymisnopeus [W]
\dot{Q}_{out}	Aukkojen läpi ulos menevien kaasujen lämmönsiirtymisnopeus [W]
\dot{Q}_{wall}	Säteilemällä ja kuljettumalla palotilan pintoihin poistuvan lämmön siirtymisnopeus [W]
p	Indeksi, jolla otetaan huomioon suuronnettomuuksien henkilövahinkojen seuraukset
P	Tapahtuman todennäköisyys
P_R	Komponentin luotettavuuden todennäköisyys
P_F	Vikaantumisen todennäköisyys
R	Riskin suuruus
S	Henkilön poistumisnopeus [m/s]
t	Aika [s]
t_a	Ajanjakso palonilmaisusta palohälytykseen [s]
t_d	Ajanjakso palon syttymisestä palonilmaisuun [s]
t_e	Siirtymisvaiheeseen kuluva aika [s]
t_i	Poistumisen valmisteluun kuluva ajanjakso [s]
t_o	Reagointivaihe [s]
T	Ilman lämpötila paloalueella [°C]
T_0	Paloa ympäröivän ilman lämpötila, alkulämpötila [°C]
u	Kaasun virtausnopeus [m/s]
W_e	Tehollinen leveys [m]
z	Tarkastelukorkeus [m]
z_0	Luonnollisen origon paikka [m]
α	Palotehon kasvukerroin [kW/s ²]
ε	Dissipatio
κ	Vakioarvo McCaffreyn palopatsasmallissa
λ	Vikaantumistaajuus
η	Vakioarvo McCaffreyn palopatsasmallissa
ρ_0	Paloa ympäröivän ilman tiheys [kg/m ³]
χ	Teoreettisen palamislämmön pienennyskerroin

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta, tavoitteet ja menetelmät

Oletettuun palonkehitykseen perustuvan lähestymistavan eli toiminnallinen palomitoituksen käsite tunnettiin jo 1970 -luvun alkupuolella, jolloin kehittyi ajatus toimintamallista, jossa paloteknisten ratkaisujen hyväksyttävyyttä voitiin saavuttaa muillakin kuin perinteisillä luokkavaatimukset täyttävillä ratkaisuilla. (Meacham 1996, s. 2) Viimeisen vajaan 50 vuoden aikana laskentatyökalujen ja tietotaidon kehittyminen sekä toiminnallisen vaihtoehdon sisällyttäminen rakennuksia koskeviin palomääräyksiin ovat lisänneet useissa maissa kiinnostusta toiminnallista paloturvallisuussuunnittelua kohtaan. Suomessa erityinen kehitystä vauhdittanut edistysaskel tapahtui vuonna 1997, jolloin Suomen Rakentamismääräyskokoelman osa E1 ”Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu” mahdollisti ensimmäisen kerran toiminnallisen lähestymistavan hyödyntämisen paloturvallisuussuunnittelussa. Nykyisin toiminnalliset tarkastelut näyttävät ottaneen pysyvän jalansijan osana paloturvallisuuden suunnittelukenttää varsinkin vaativammassa rakennuskohteissa. Menetelmän yleistyttyä yksi tämän tutkimuksen tavoitteista on tuoda esille toiminnallisen palomitoituksen tuomia mahdollisuuksia sekä käsitellä suunnitteluprosessin etenemistä yleisellä tasolla. Toimintavaiheiden ohjenuorana käytettiin kansainvälisen paloinsinööriyhdistys SFPE:n julkaisemaa teosta (SFPE Engineering 2007) soveltaen asioita kuitenkin suomalaisen suunnittelukäytäntöön sopivaksi. Suomessa julkaistuista ohjeteoksista tässä yhteydessä mainittakoon esimerkiksi Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisu RIL (221 - 2003) oletettuun palonkehitykseen perustuvasta suunnittelusta sekä Ruukin (2008) julkaisu rakenteiden toiminnallisesta palomitoituksesta.

Toiminnalliseen paloturvallisuussuunnitteluun liittyy läheisesti käsite paloriskeistä ja niiden hallinnasta rakennuksen elinkaaren aikana. Riski koostuu kahdesta komponentista; seuraamuksen vakavuudesta ja niiden todennäköisyydestä. Suomessa viimeisten vuosien aikana (2009 - 2013) rakennuspaloja kaikki rakennukset mukaan lukien on vuosittain ollut noin 6000, joiden suurimpina aiheuttajina ovat olleet ihmisen toiminta tai kone-/laitevika. (Pelastustoimi 2014) Ihmishenkiä on menetetty vuosittain yli 50 ja rakennuksille on aiheutunut mittavia omaisuusvahinkoja, joten huoli paloriskien hallintaa ja ”riittävän” turvallisuustason saavuttamista kohtaan on aiheellinen. Yleisesti ottaen paloriskianalyysissä arvioidaan tilastoihin tai muihin lähteisiin perustuen mahdollisten palojen todennäköisyyttä ja seurauksia, jolloin tavoitteena on seuloen rajata palomitoituksessa tarkasteltavat tilat ja paloskenaariot. Riskianalyysi on mahdollista tehdä joko kvalitatiivisesti tai kvantitatiivisesti. Mitoitavimmille, mutta samalla riittävän realistisille palotilanteille suoritetaan toiminnallinen tarkastelu, jonka tulosten pohjalta voidaan tehdä päätöksiä rakennuskohteen paloteknisistä ratkaisuista.

Tässä tutkimuksessa paloriskianalyysi ja toiminnallinen palomitoitus viedään seuraavalle tasolle, kun tarkasteltavalle kohteelle aiheutuvaa kokonaispaloriskiä arvioidaan täysin kvantitatiivisesti, jolloin jokaiselle paloskenaarion todennäköisyydelle ja seuraukselle määritetään numeerinen arvo hyödyntäen luvussa kolme esitettyjä todennäköisyys- ja seurausanalyysin työkaluja. Tarkastelun tutkimusstrategiana on tapaustutkimus, jonka case -kohteena on erään Suomessa toimivan tehdasrakennuksen yhteydessä sijaitseva varastotila. Nykyisillä järjestelyillä varasto aiheuttaa palon sattuessa merkittävän paloturvallisuusriskin koko tehdasalueen toiminnalle. Tarkastelu on luonteeltaan vertaileva, jossa arvioidaan erilaisten parannusten vaikutusta palon aiheuttaman omaisuusvahingon vuosittaiseen odotusarvoon.

Tarve varastotilan riskitarkastelulle kehittyi yrityksen (jatkossa tilaaja) omasta tahdosta kartoittaa tapoja nykyisen varastotilan paloriskien alentamiseksi. Ennen tätä tutkimusta kohteeseen oli tehty vierailukäynti, jossa selvitettiin kohteen nykytilanne. Samalla esitettiin ”kevyitä” parannusehdotuksia varaston turvallisuuden parantamiseksi. Kustannuksiltaan merkittävämpien toimenpiteiden kannattavuuden arvioimiseksi toisessa vaiheessa tehtiin vertaileva riskitarkastelu, jonka suoritus on kuvattu tässä työssä. Tarkastelusta on esitetty tilaajalle viralliset tulokset erillisessä raportissa, mutta anonyymiyden nimissä tässä diplomityössä kohteen yritys ja taloudelliset luvut pidetään julkaisemattomana. Tulokset esitetään riskisuhdelukujen avulla, jolloin on mahdollista vertailla vaihtoehtojen välisiä tuloksia keskenään. Lisäksi keskitytään yleisesti arvioimaan vertailevan menetelmän toimintaa käytännön sovelluskohteessa samalla käyden läpi toiminnallisten tarkasteluiden toimintatapoja ja työkaluja.

Tarkastelun työkaluina ovat erityisesti vika- ja tapahtumapuut sekä palosimulaatio-ohjelma FDS, joita käytetään arvioitaessa turvallisuustoimintojen todennäköisyyksiä sekä skenaarioiden seurauksia. Yrityksen omaan riskistrategiaan liittyen paloturvallisuuden tiimoilta järjestettiin myös pienimuotoinen polttokoe, joiden havaintoja osittain hyödynnetään mitoituspalon määrityksessä.

1.2 Tutkimuksen rakenne ja rajoitukset

Tutkimus on jaettu kymmeneen lukuun, jonka pää rakenne koostuu teoriaosuudesta, tapaustutkimuksen työvaiheesta, tulososiosta sekä yhteenvedosta. Teoriaosuudessa esitellään, mitä on toiminnallinen palomitoitus, kuinka se sijoittuu toiminnallisen palotekniikan suunnittelun kentälle ja erityisesti, miten suunnitteluprosessi etenee. Luvun edetessä käydään askel askeleelta läpi projektin kulku lähtövaiheista lopulliseen dokumentointiin.

Kolmas luku sisältää toiminnallisen tarkastelun yleisimpiä työkaluja. Yksi suurimmista haasteista paloriskianalyysissä ovat palotapahtumien todennäköisyyksien määrittäminen ja hyväksyttävän taajuustason arviointi. Silloin on tarpeen rikkoa palotapahtumaprosessi useisiin pienempiin komponentteihin, joiden avulla pystytään tilastollisesti tai muilla keinoin ennustamaan koko tapahtuman todennäköistä esiintymistaajuutta. Tähän soveltuvia tekniikoita ovat vika- ja tapahtumapuut, joita käsitellään luvun alkuosassa. Luvun

loppuosan tarkastelun kohteina ovat toiminnallisten tarkasteluiden laskentamenetelmät, joiden hyödyntäminen on tarpeen selvitetessä tapahtumien seuraukset. Tässä työssä käsitellään yksinkertaisia laskentamenetelmiä sekä vyöhyke-, kenttä- ja poistumismalleja.

Luvut 4 - 9 käsittävät tapaustutkimuksen suorittamisen. Neljäs luku sisältää kohteen yleisesittelyn ja tarkemman selvityksen, kuinka tutkimuksen kulku loppuosin tulee eteneeseen. Myöhemmissä luvuissa käydään läpi tapahtumatarkastelujen todennäköisyydet, palosimulaatiomallin sisältö, seurauskustannusten määräytyminen, simulaatiotulokset sekä vuosittainen kokonaisriski eri toteutusvaihtoehdoissa herkkyystarkasteluineen. Luvussa 10 tehdään toteutusvaihtoehtojen suhteen johtopäätökset sekä käsitellään yleisesti menetelmään käyttöön liittyviä asioita. Tarkastelussa rajoitutaan pelkästään omaisuusvahinkoriskeihin.

2 TOIMINNALLINEN PALOMITOITUS

2.1 Lainsäädäntö

Lainsäädännöllisesti paloturvallisuussuunnittelua ohjaavat pelastuslaki (379/2011) sekä maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999), jotka määräävät rakennuksen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla paloturvalliseksi. Molempien lakien tavoitteina paloturvallisuuden osalta ovat muun muassa ihmisten poistumisturvallisuuden varmistaminen, pelastus- ja sammutustoiminnan onnistuminen sekä omaisuusvahinkojen minimointi. Lisäksi pelastuslaki (14 §) velvoittaa ehkäisemään tulipalojen syttymistä ja muiden vaaratilanteiden syntymistä, varautumaan kohteessa olevien henkilöiden, omaisuuden ja ympäristön suojeluun ja ryhtymään mahdollisiin sammutustoimenpiteisiin palon niin vaatiessa. Edellä mainittujen kohtien ohella maankäyttö- ja rakennuslaki (117b §) korostaa rakennuksen paloturvallisuudessa otettavan huomioon lisäksi kantavien rakenteiden riittävän palonkeston sekä palon hallintaan saamisen soveltuvilla rakennustuotteilla ja teknisillä laitteistoilla. Maankäyttö- ja rakennuslakia tarkentavia säännöksiä annetaan maankäyttö- ja rakennusasetuksessa (895/1999).

Maankäyttö ja rakennuslain pykälään 13 § nojautuen Ympäristöministeriö ylläpitää Suomen rakentamismääräyskokoelman E-sarjaa, johon kootaan lain nojalla annetut rakennusten paloturvallisuutta koskevat säännökset ja rakentamismääräykset sekä ministeriön ohjeet. Rakentamismääräyskokoelmassa E on seitsemän voimassa olevaa osaa, joista osa E1 (2011) on oleellisin käsittäen rakennusten paloturvallisuuden määräykset ja ohjeet. Määräysten ja ohjeiden käytännön soveltamisesta Ympäristöministeriö on julkaissut oppaan ”Rakennusten paloturvallisuus & Paloturvallisuus korjausrakentamisessa” (YO39 2003). Ympäristöoppaasta on valmisteilla uudempi versio, johon päivitetään tulkintaohjeet nykyisestä E1:stä (2011).

Paloturvallisuusvaatimus on määritetty yhdeksi olennaisimmista asioista rakennuksessa myös Euroopan parlamentin ja neuvoston rakennustuoteasetuksessa (EU 305/2011), jota Suomi on velvollinen noudattamaan Euroopan Unioniin kuuluvana valtiona. Asetuksen mukaan rakennuskohde tulee suunnitella ja rakentaa niin sanottujen olennaisten vaatimusten mukaan. Jokainen maa on kuitenkin omissa kansallisissa määräyksissään vapaa päättämään säännöt, kuinka määräystä noudatetaan.

2.2 Olennainen vaatimus ja vaatimuksen täyttymisen osoittaminen

Kaikki palotekninen suunnittelu perustuu Suomen Rakentamismääräyskokoelman E-sarjan mukaisten olennaisten vaatimusten täyttämiseen riippumatta siitä, millaiset ovat palotekniset suunnittelukäytännöt. Osaan E1 (2011, kohta 1.2.1) kootut voimassa olevat olennaiset vaatimukset on määritetty pelastuslaissa (379/2011, 9§) ja maankäyttö- ja rakennusasetuksessa (895/1999, 50§). Lisäksi ne täyttävät myös EU:n rakennustuoteasetuksen (305/2011) vaatimukset.

- ❖ rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan;
- ❖ palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rakennuksessa tulee olla rajoitettua;
- ❖ palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa;
- ❖ rakennuksessa olevien henkilöiden on voitava palon sattuessa päästä poistumaan rakennuksesta tai heidät on voitava pelastaa muulla tavoin;
- ❖ pelastushenkilöstön turvallisuus on rakentamisessa otettava huomioon.

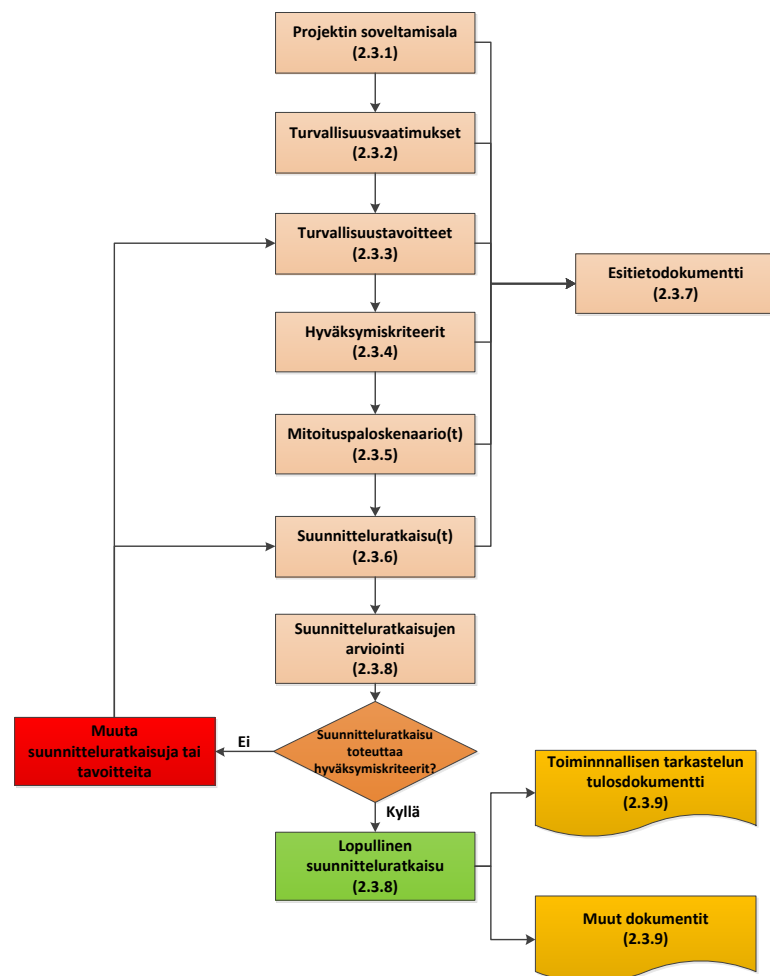
Suomessa paloturvallisuusvaatimukset täyttävä rakennus on mahdollista suunnitella ja rakentaa kolmella eri tavoin. Ensimmäinen lähestymistapa perustuu suoraan Rakentamismääräyskokoelman E1 (2011) antamien paloluokitusten ja annettujen lukuarvojen vähimmäisvaatimusten noudattamiseen. Tällaisia vähimmäisvaatimuksia ovat esimerkiksi rakennuksen suurin sallittu henkilömäärä, palo-osaston pinta-ala, etäisyys lähimpään uloskäytävään tai pienin sallittu kantavan rakenteen palonkesto. Tällöin paloturvallisuusvaatimuksen täyttymistä ei tarvitse erikseen osoittaa.

Suurissa ja monimutkaisissa rakennuskohteissa E1:n määräyksiä on kuitenkin hankalaa toteuttaa sellaisenaan, koska joihinkin rakenteisiin tai tiloihin määräykset eivät suoranaisesti sovellu tai ne muuten saattavat vaatia erityishuomiota paloteknisessä mielessä. Esimerkkikohteita ovat maanalaiset tilat, ylikorkeat rakennukset tai suuren pinta-alan omaavat kauppakeskukset. Lisäksi yksinkertaisuutensa vuoksi taulukkomitoitustyyppinen suunnittelu ei välttämättä tuota käyttötarkoitukseen optimaalisia ja taloudellisesti järkeviä ratkaisuja, joten paloturvallisuussuunnittelussa sallitaan myös oletettuun palonkehitykseen perustuva lähestymistapa eli toiminnallinen palomitoitus. (E1 2011, 1.3.1 ja 1.3.2) Tällöin vaadittava turvallisuustaso saavutetaan ottamalla huomioon rakennuksen erityisominaisuudet ja käyttötarkoitus. Perusteellisesti toteutettuna toiminnallinen palotekninen suunnittelu tarjoaa tehokkaamman keinon saavuttaa kohdekohtainen paloturvallisuus ja sen avulla saadaan tarkempi tietämys kohteen riskeistä verrattuna perinteiseen taulukkomitoitukseen. Lisäksi erilaisia vaihtoehtoja voidaan helpommin vertailla keskenään. (SFPE Engineering, 2007, s. 5) Suunnitteluratkaisut voivat olla myös toiminnallisen ja taulukkomitoituksen yhdistelmä ja ne voivat koskea yhtä, useampaa tai kaikkia edellä mainittuja paloturvallisuuden olennaisia vaatimuksia.

2.3 Toiminnallisen palomitoituksen prosessi

Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu tulisi aloittaa jo hankesuunnitteluvaiheessa, jolloin palotekninen suunnittelijan on mahdollista vaikuttaa riittävän ajoissa tulevan rakennuksen suunnitteluratkaisuihin. Tällöin todennäköisesti saavutetaan monia hyötyjä, kuten suunnitelmamuutosten joustavuus, monipuoliset vaihtoehdot rakenteissa ja materiaalivalinnoissa, yhtäläinen tai parempi paloturvallisuus sekä hinta-laatusuhteen optimointi. (SFPE Engineering 2007, s. 15)

Toiminnallisen palomitoituksen suunnitteluprosessissa voi olla useita eri lähestymistapoja, joiden avulla saavutetaan hyväksyttävä ja turvallinen suunnitteluratkaisu. Seuraavaksi kappaleissa 2.3.1 – 2.3.9 käydään läpi toiminnallisen palomitoituksen vaiheittainen kulku, joka pohjautuu teokseen ”SFPE Engineering Guide to Performance - Based Fire Protection 2nd Edition” (2007). Kuvassa 2.1 kaaviomuotoon muokattu malli on yleisesti hyväksytty menetelmä, johon hyvän käytännön mukaisessa suunnittelussa tulisi pyrkiä. Kaaviossa eteneminen on luonteeltaan kuitenkin joustavaa, jolloin sitä voidaan tapauskohtaisesti soveltaa yksittäisen projektin vaatimuksen mukaiseksi. Lisäksi suunnittelun eri vaiheissa on mahdollista valita vapaasti tilanteeseen sopivat laskentamallit ja -menetelmät. (Hurley 2008, s. 3-442)



Kuva 2.1. Toiminnallisen palomitoituksen eteneminen (SFPE Engineering 2007)

Pohjoismainen standardointijärjestö INSTA (Inter Nordic Standardisation Cooperation) on julkaissut toiminnallisen palomitoituksen suunnittelua ohjeistavan teknisen spesifikaation ”INSTA 950, Fire Safety Engineering – Verification of fire safety design in buildings”, jonka tarkoituksena on toimia työkaluna muun muassa lähtöarvojen valinnalle, toiminnallisen palomitoitus suunnittelun etenemiselle sekä arvioinnin tueksi hyväksyttävälle suunnitteluratkaisulle. (INSTA/pr TS 950 2012) Lähitulevaisuudessa suunnitteluohjeesta voi olla merkittävä hyöty toiminnallisissa tarkasteluissa Suomessa, koska Pohjoismaisittain yhtenäinen suunnittelukäytäntö helpottanee paloteknisten ratkaisujen vertailukelpoisuutta. Spesifikaatio on tämän tutkimuksen laadintahetkellä julkaistu jo Ruotsissa. Lisäksi se otetaan käyttöön Norjassa ja todennäköisesti myös Tanskassa. Suomessa spesifikaatio otetaan käyttöön kansallisin valinnoin uudistuvaan Ympäristöoppaaseen 39 liittyen.

2.3.1 Projektin soveltamisala

Toiminnallinen palomitoitus on aina kohdekohtainen tarkastelu, jossa ensimmäinen askel on määrittää projektin laajuus, jolloin tunnistetaan suunnittelua ohjaavat tekijät. Kohteen laajuus (scope) voi vaihdella yhdestä rakennusosasta useisiin rakennuksiin, joiden tarkastelu voi olla luonteeltaan uudis- tai korjaussuunnittelua. Tulevaa suunnittelua varten on selvitettävä, millainen rakennus halutaan olevan ominaisuuksiltaan (käyttö, geometria, toiminnot jne.) ja millaisia ihmisiä sitä käyttää (lapset, aikuiset, liikuntarajoitteiset, asukas/vierailija jne.). Lisäksi otetaan huomioon suunnittelua rajoittavat tekijät, joilla tarkoitetaan tarkoituksenmukaisia normijärjestelmiä, suunnitteluohjeita ja vakuutusyhtiöiden antamia vaatimuksia liittyen rakennuksen paloturvallisuuteen. (SFPE Engineering 2007, s. 29 – 33)

Käytettävissä oleva budjetti ja aikataulu vaikuttavat myös oleellisesti, kuinka suuressa laajuudessa toiminnallista tarkastelua pystytään tekemään. Erinäisiä esille otettavia asioita voivat olla myös esimerkiksi kohteen sijainnin vaikutus suunnitteluun, ympäristölliset näkökohdat ja historiallisesti suojeltavat rakenteet. (SFPE Engineering 2007, s. 29 – 33) Palomitoitusmenettelystä riippumatta on tärkeää pitää palosuunnittelun aloituspalaveri rakennuttajan, rakennusvalvontaviranomaisen ja kohteen suunnittelijoiden kesken, mutta toiminnallisen palomitoituksen tapauksessa tärkeys korostuu entisestään. (Ruukki 2008, s. 3)

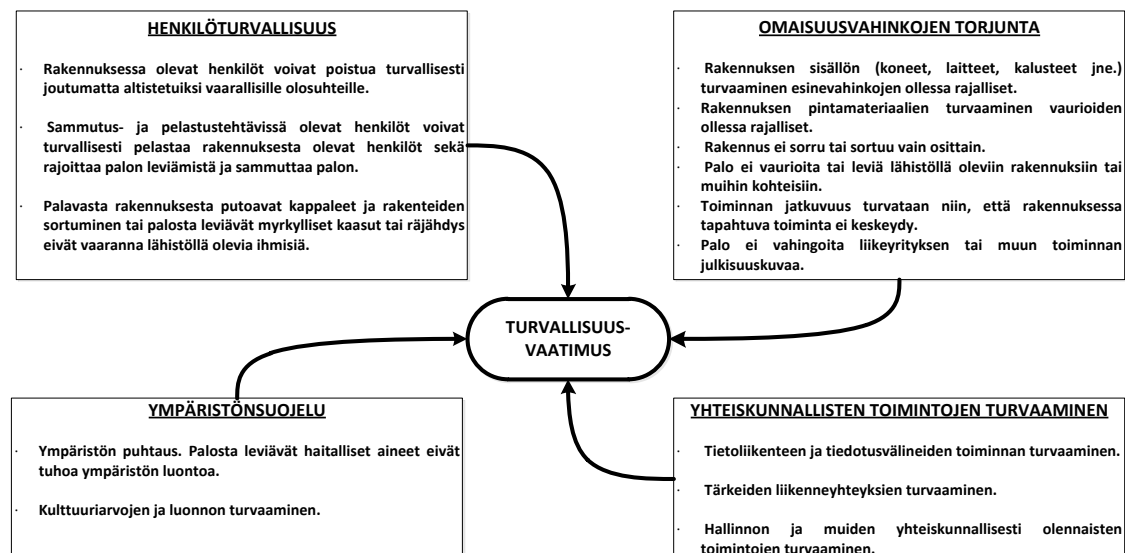
2.3.2 Turvallisuusvaatimukset

Turvallisuusvaatimukset voivat tulla joko toiminnallisen palotekniseen suunnitteluun soveltuvista standardeista tai erityisesti projektissa mukana olevilta intressitahoilta. Projektin läpiviennin kannalta yhteiskunta on merkittävin intressitaho, koska suunnitelmat on hyväksyttävä toimivaltaisella viranomaisella, joka vastaa lainsäädännön toteutumisesta. Toimivaltaisella viranomaisella (engl. AHJ) tarkoitetaan tässä yhteydessä paikallista rakennusvalvonta- ja pelastusviranomaista tai julkishallinnollista organisaatiota, kuten esimerkiksi Säteilyturvakeskusta. Koska Suomessa toiminnallinen palotekninen

suunnittelu perustuu Suomen Rakentamismääräyskokoelmaan E1 (2011), yhteiskunnallinen turvallisuusvelvoite on toteuttaa pelastuslakiin (379/2011) sekä maankäyttö- ja rakennusasetukseen (895/1999) pohjautuvat paloturvallisuuden olennaiset vaatimukset.

Muita turvallisuusvaatimuksia esittäviä tahoja voivat olla tilaaja, vakuutusyhtiöt, rahoittajat ja rakennuksen käyttäjät. Esimerkiksi omaisuuden suojaamiseen ja tuotantoprosessin toimintojen jatkumiseen liittyvät vaateet määräyksissä voivat tilaajan mielestä olla liian laveasti määriteltyjä, jolloin on tarpeen sopia tarkemmin spesifioituista vaatimuksista. (Hurley 2008, s. 3-449) Toisaalta vakuutusyhtiöillä on omia kriteereitään rakennuksen vakuutuskelpoisuudelle tai palovakuutusmaksuille. Paloturvallisuusvaatimukset voivat myös olla ristiriidassa esimerkiksi arkkitehtien tai LVI-suunnittelijoiden intressien kanssa. Arkkitehdit saattavat esimerkiksi tavoitella avaria tilakokonaisuuksia kevyillä ja helposti siirrettävillä väliseinillä, jolloin paloturvallisuusvaatimusten toteuttaminen taulukkomitoituksen keinoin aiheuttaa mahdollisesti ongelmia esimerkiksi evakuoinnin sekä palon ja savun leviämisen kanssa. Ratkaisujen paloteknistä toteutettavuutta tuleekin arvioida jatkuvasti yhteistyössä eri suunnittelijaosapuolten kesken.

Rakennukselle määritettävät paloturvallisuusvaatimukset voidaan jakaa paloturvallisuustasoa arvioitaessa neljään kategoriaan, joita ovat henkilöturvallisuus, omaisuuden suojaus, yrityksen ja yhteiskunnallisten toimintojen turvaaminen sekä ympäristön suojele kuvan 2.2 mukaisesti. (SFPE Engineering 2007, s. 36) Näiden arviointiperusteet ja turvallisuusratkaisujen hyväksymisperusteet poikkeavat merkittävästi toisistaan, joten erittely on tarpeen.



Kuva 2.2. Neljän turvallisuusvaatimuksen tavoitenäkökulmia (muokattu RIL 221 - 2003, s.13)

Henkilöturvallisuusvaatimuksissa tärkeintä on ihmisten terveys, kun taas omaisuuden suojaus ja yhteiskunnallisten toimintojen turvaaminen tähtäävät taloudellisten tappioiden minimointiin. Ympäristön suojelussa prioriteetti on luonnonolosuhteiden ja kulttuurillisesti arvokkaiden kohteiden säilyttäminen. (RIL 221 - 2003, s. 12)

2.3.3 Turvallisuustavoitteet

Suunnitteluprosessin seuraavana askeleena on selvittää turvallisuustavoitteet, jotka perustuvat tilaajan haluamaan turvallisuustasoon sekä edellä mainittuihin yhteiskunnan ja muiden sidosryhmien asettamiin turvallisuusvelvoitteisiin. Samoin kuin vaatimukset, turvallisuustavoitteet on hyvä sopia projektin alkuvaiheessa yhdessä tilaajan, toimivaltaisen viranomaisen, vakuutusyhtiön ym. asianosaisten kanssa. (Kokkala 2000, s. 19) NFPA 101 (2012) määrittelee tavoitteen turvallisuusvaatimuksen täyttäväksi tasoksi. Tavoitteet ovat yksityiskohtaisemmat kuin vaatimukset ja ne ilmaistaan hyväksyttävänä tappioiden tai sallittuina riskitasoina.

Turvallisuustason valintaan vaikuttavat yrityksen omat arvot ja riskikustannusten minimointi. Korkeaan turvallisuustasoon luottava yritys voi luoda kuluttajien silmissä positiivisia mielikuvia luotettavuudesta, jotka heijastuvat suurempana myyntinä tai parempana maineena markkinoilla. Toisaalta yllättävät onnettomuudet tai pienetkin vahingot yrityksen tiloissa näkyvät heti imagotappioina, joita ei voida rahallisesti mitata. Riskikustannusten minimoinnissa puolestaan lähtökohtaisesti tavoitteena on suurvahinkojen välttäminen, koska suurpalo voi pahimmassa tapauksessa vaarantaa koko yrityksen toiminnan jatkuvuuden. Vasta toisella sijalla on vahinkokustannusten minimointi. (RIL 221 - 2003, s. 23 - 24)

Yrityksen omien arvojen, riskien arvioinnin ja määritettyjen turvallisuustavoitteiden pohjalta asetetaan turvallisuustavoitteet. Tilaajan määrittämät tavoitteet voivat olla verrattain laajoja, kuten ”Tuotannon keskeyttämisestä aiheutuvat kustannukset on oltava mahdollisimman pienet”. Muita esimerkkejä paloturvallisuustavoitteista ja prosessin etenemisestä on esitetty taulukossa 2.1. Useimmiten tilaaja määrittelee tavoitteet laadullisin keinoin, joten suunnittelijan on muutettava tavoitteet ”palotekniselle kielelle”. Näiden pohjalta voidaan laatia myöhemmin hyväksymiskriteerit. (SFPE Engineering 2007, s. 43)

2.3.4 Hyväksymiskriteerit

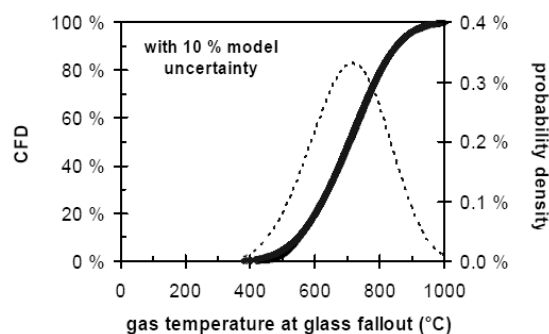
Kun paloturvallisuusvaatimukset ja edelleen suunnittelun tavoitteet on määritelty, paloturvallisuussuunnittelijan on asetettava hyväksymiskriteerit. Jatkossa näiden kriteerien tulee täytyä arvioitaessa suunnitteluratkaisujen hyväksyttävyyttä. Hyväksymiskriteerit voivat olla esimerkiksi raja-arvoja, arvovälejä tai todennäköisyysjakaumien fraktiileja. Kriteerit täytyy luoda kuvastamaan paloturvallisuustavoitteita kvantitatiivisesti, jolloin ne toimivat vahinkojen mittarina. Tässä vaiheessa ei ole oleellista tietää tarkasti keinoja vahinkojen välttämiseksi, mutta hyväksyttävät fysikaaliset raja-arvot materiaali- ja henkilövahingoille sekä mittaustapa on määritettävä. (SFPE Engineering 2007, s. 46) Hyväksymiskriteerit valitaan perustellusti luotettavista lähteistä ottaen huomioon tarkasteltavan kohteen luonne. Joissain tilanteissa hyväksyttävyyttä on helpompi arvioida arvojoukon kautta verrattuna pelkkään yksittäiseen raja-arvoon.

Taulukko 2.1. *Esimerkkejä intressitahojen vaatimuksista, turvallisuustavoitteista, suunnittelutavoitteista ja hyväksymiskriteereistä (muokattu Hurley 2008, s. 3-445)*

<i>Turvallisuusvaatimus</i>	<i>Turvallisuustavoite</i>	<i>Suunnittelutavoite</i>	<i>Hyväksymiskriteeri</i>
Tulipaloihin liittyvät loukkaantumiset minimoidaan ja ehkäistään kohtuuttomat ihmishenkien menetykset.	Tilassa, jossa palo syttyy, ei tapahdu ihmishenkien menetyksiä.	Tilassa, jossa palo syttyy, ehkäistään lieskahdus.	Ylemmän kuuman kerroksen lämpötila ei ylitä 200 °C.
Minimoidaan tulipalosta johtuvat vauriot rakennukselle ja sisällä olevalle irtaimistolle.	Syttyneen tilan ulkopuolella ei merkittäviä lämmöstä aiheutuvia vaurioita.	Minimoidaan palon leviämisen todennäköisyys syttyneestä tilasta muihin tiloihin.	Ylemmän kuuman kerroksen lämpötila ei ylitä 200 °C.
Minimoidaan tulipalon vaurioista aiheutuvat odottamattomat prosessikatkokset ja taloudelliset menetykset.	Seisokkiaika ei ylitä 8 tuntia.	Rajoitetaan kohteen savuallistus hyväksyttävyyserajan alapuolelle.	HCl ei ole suurempi kuin 5ppm. Kaasuseoksen tiheyden oltava alhaisempi kuin 0,5 g/m ³ .
Rajoitetaan palon ja paloturvallisuustoimien ympäristövaikutuksia.	Palosammutusvedet eivät aiheuta veden saastumista.	Löydetään keinot sammutusvesien keräilylle.	Keräilymenetelmän kapasiteetti on oltava vähintään 1,2 kertaa suunnitteluarvoa suurempi.

Arvioitaessa riittävää turvallisuustasoa käytettävänä keinoina ovat tiettyihin arvoihin perustuvat deterministiset, todennäköisyysperusteiset (stokastinen) tai riskianalyttiset hyväksymiskriteerit. Henkilöturvallisuuteen liittyviä deterministisiä hyväksymiskriteerejä ovat mm. lämpöaltistus (lämpösäteily, kaasun lämpötila) ihmiselle, altistus myrkyllisille kaasuille ja näkyvyyskriteerit evakuoinnin aikana. Rakenteisiin ja tilaan kohdistuvia kriteereitä ovat mm. lämpöaltistus, palon leviäminen, rakenteen kantavuus ja osastoivuus sekä savun vaikutukset. (SFPE Engineering 2007, s. 47 - 49) Esimerkkejä käytännön hyväksymiskriteereistä on esitetty taulukossa 2.1.

Numeeristen arvojen valinta ei ole läheskään aina yksikäsitteistä. Tästä hyvänä esimerkkinä on lasin rikkoutumislämpötila, joka voi vaihdella usealla sadalla asteella palo-olosuhteista riippuen. (Alvarez 2013, s. 258) Lasin tapauksessa deterministinen hyväksymiskriteeri yksittäisenä arvona ei välttämättä ole käytännöllisin vaihtoehto, koska kirjallisuudessa (mm. Hietaniemi 2005a) on lukuisia määriä kokeellisia tuloksia lasin rikkoutumislämpötiloista. Tällöin on syytä harkita todennäköisyysjakauman fraktiilin käyttöä hyväksymiskriteerinä. Kuvan 2.3 tapauksessa numeerisen mallintamisen menetelmällä on kehitetty kertymäfunktio lasin rikkoutumislämpötilalle ottaen lisäksi huomioon 10 % epävarmuus. Käyrän avulla on mahdollista määrittää hyväksyttävä todennäköisyys rikkoutumislämpötilaksi (esimerkiksi 5/95 % fraktiili).



Kuva 2.3. *Todennäköisyysjakauma lasin rikkoutumislämpötilasta ottaen huomioon 10 % epävarmuus (Hietaniemi 2005a, s. 73)*

Riskianalyttiset hyväksymiskriteerit ovat todennäköisyyspohjaisten menetelmien laajennus, jossa tarkastellaan epätoivottavien tapahtumien todennäköisyyksien lisäksi niiden aiheuttamien seurausten vakavuus. Riskianalyttiset kriteerit määritetään tilastollisin tai todennäköisyyden keinoin ja ne ovat tarpeen kokonaisriskitarkastelussa, kun halutaan saada selville rakennuksen hyväksyttävä kokonaisturvallisuustaso minimoiden samalla kustannukset. (Hadjisophocleous 2000, s. 17) Riskianalyttisiä tarkastelumenetelmiä on käsitelty tarkemmin myöhemmin, mutta hyväksymiskriteeri voidaan esittää esimerkiksi F-N -käyrän avulla. (kuva 2.11)

Valitut kriteerit dokumentoidaan esitietopaperiin ja niille haetaan hyväksyntä paikalliselta palo- ja rakennusviranomaiselta sekä tarvittaessa myös muilta projektin osapuolilta. (Hietaniemi 2007a, s. 13)

2.3.5 Uhkakuvat ja mitoituspaloskenaariot

Hyväksymiskriteerien jälkeen suunnittelussa täytyy keskittyä palon kehittymisen arviointiin ja vaihtoehtoisten suunnitteluratkaisujen löytämiseen valittujen kriteerien täyttämiseksi. Jotta suunnitteluratkaisuihin päästään käsiksi, aluksi on kehitettävä mahdollisia uhkakuvia eli paloskenaarioita. Tämän jälkeen skenaarioista valitaan mitoitettavimmat palotapahtumat, joille määritetään lukuarvot ja suoritetaan laskenta.

2.3.5.1 Uhkakuvat

Paloskenaariot kuvaavat mahdollisia tapahtumasarjoja ja tilan olosuhteiden muutoksia, kun palo ja siitä syntyvät palamistuotteet leviävät koko rakennukseen tai osaan sitä. Paloskenaariot koostuvat tekijöistä, jotka ovat kriittisiä palon kehittymiselle ja vaikutuksille, kuten esimerkiksi syttymislähteet, palokuorman ominaisuudet ja sijainti, palontorjuntalaitteet, ilmanvaihto, kantavat rakenteet sekä tilan käyttäjät. Toisin sanoen paloskenaarioiden kuvauksessa kysytään, miten, missä ja milloin palo tapahtuu. Skenaarioiden pahimman tapauksen lopputuloksena rakennus, sen irtaimisto tai tilan käyttäjät ovat uhattuna. Paloskenaario voi myös sisältää syttymistä edeltäviä olosuhteita, jos ne oleellisesti vaikuttavat myöhempään palotapahtumiin. (SFPE Engineering 2007, s. 54)

Jotta voidaan muodostaa mahdollisimman kattava näkemys paloskenaarioista, tarvitaan lähtötietoja rakennuksesta, tiloissa olevista ihmisistä ja oletuksia palavien materiaalien palokäyttäytymisestä. Kaiken perustana on kattava selvitys mahdollisista ja tyypillisimmistä rakennuksen palokuormista ja syttymislähteistä, joita on listattu taulukkoon 2.2. Lisäksi taulukoissa 2.4 – 2.6 on listattu lähtötietoja, joita hyödynnetään tarvittavissa määrin. Todennäköisesti kaikki tarvittava informaatio ei ole hankkeen tässä vaiheessa vielä selvillä, joten lähtötietoihin joudutaan tekemään oletuksia tarkastelujen läpiviemiseksi. Tehdyt oletukset on kuitenkin aina perusteltava.

Pelastustoimen (2014) tilastoaineiston perusteella ihmisen toiminta on yleisin rakennuspalon aiheuttaja. Huolestuttavan usein palo on sytytetty vielä tahallaan (n. 300 paloa/vuosi). Riippuen kohteesta koneiden ja laitteiden osuus kaikista syttymistä on myös varsin suuri (n. 30 %). Palon syttymisen uhkaa ei pystytä mitenkään täysin pois-

tamaan, mutta esimerkiksi tilojen siisteydellä ja toimivilla paloturvallisuusratkaisuilla pystytään vaikuttamaan palon rajautumiseen vain pieneksi paloksi.

Taulukko 2.2. *Potentiaalisia palon syttymislähteitä. (Staffanson 2010)*

Potentiaalisia syttymislähteitä		
<ul style="list-style-type: none"> - Tupakkatuotteet - Avoin liekki (kynttilä tms.) - Sähkö-, kaasu- tai öljylämmitin - Tulityö - Ruuanlaitto 	<ul style="list-style-type: none"> - Moottorit - Höyrykattilat - Koneet - Toimistotarvikkeet - Valaistustarvikkeet 	<ul style="list-style-type: none"> - Liukuhihnan tms. kitka - Reagoiva jauhe - Staattinen sähkö - Kipinäointi metallikosketuksesta - Tuhopoltto

Paloskenaarioiden tunnistuskeinoina on mahdollista käyttää useita eri menetelmiä. Hierarkisesti jaoteltuina menetelmät voidaan ryhmitellä vaaroja kartoittaviin menetelmiin, vaarojen tunnistamismenetelmiin ja onnettomuuksien mallintamismenetelmiin. (Palukka 2014, s. 13) Kuvaan 2.4 listatut menetelmät ovat luotettavuus- ja riskianalyysin perusmenetelmiä, joiden soveltuvuutta toiminnalliseen palotekniseen suunnitteluun tulee arvioida tapauskohtaisesti.

Vaaroja kartoittavat menetelmät	Vaarojen tunnistamismenetelmät	Onnettomuuksien mallintamismenetelmät
Potentiaalisten ongelmien analyysi (POA) Organisaation turvallisuusanalyysi (MORT) Reaktiomatriisi	Poikkeamatarkastelu (HAZOP) Toimintovirheanalyysi (TVA) Työn turvallisuusanalyysi (TTA) Vika- ja vaikutusanalyysi (VVA)	Vikapuuanalyysi (VPA) Tapahtumapuuanalyysi (TPA) Syy-seuraus -kaavio (SSK)

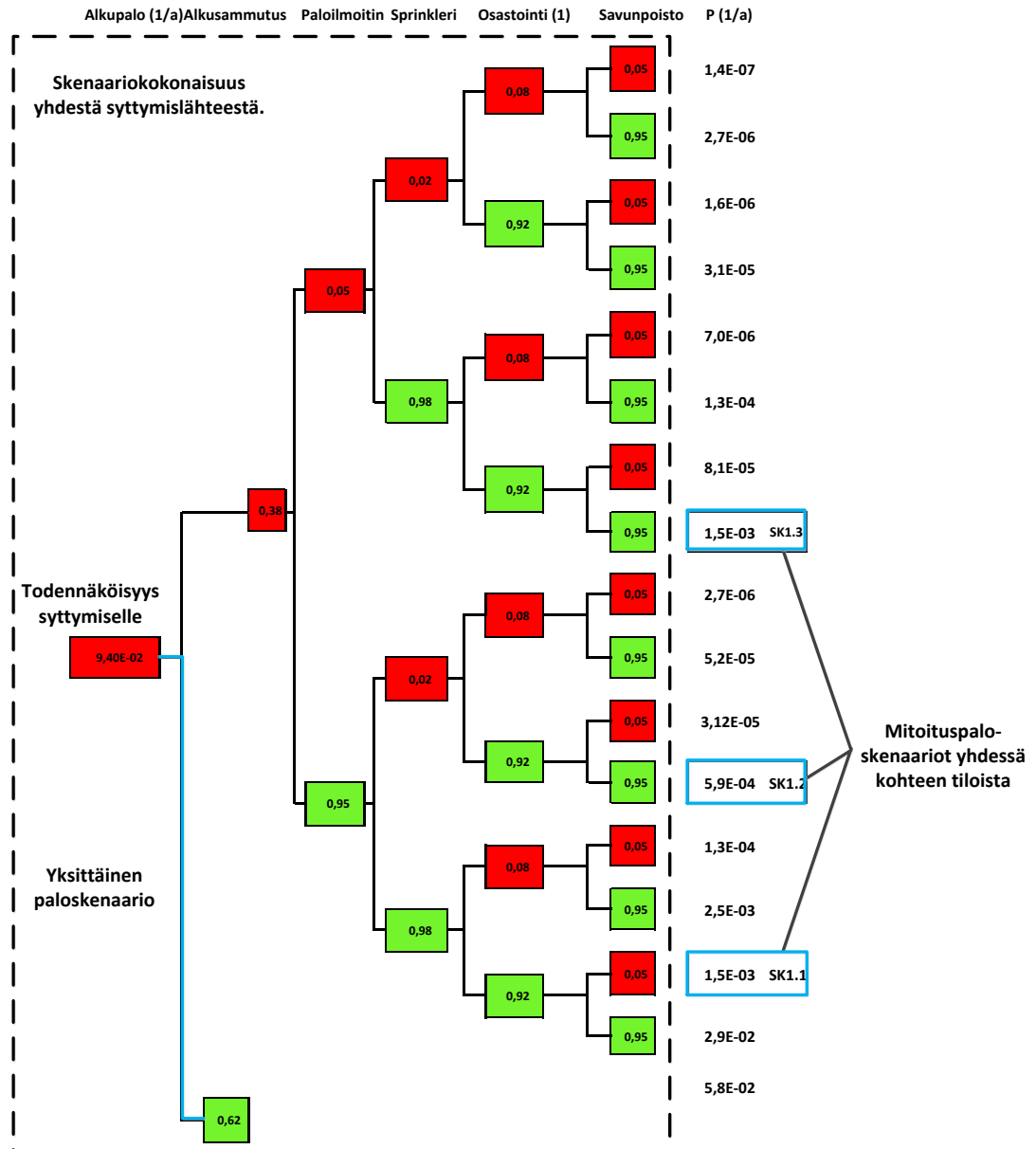
Kuva 2.4. *Riski- ja turvallisuusanalyysimenetelmien jako tavoitteiden mukaan. (Palukka 2014, s. 13)*

Vaaroja kartoittavista menetelmistä yleinen käytössä oleva menetelmä on potentiaalisten ongelmien analyysi (POA), jonka tavoitteena on löytää kohteen keskeisimmät ongelma-alueet sekä oleellisimpiin vaaroihin liittyvät onnettomuustekijät kysymällä yksinkertaisesti ”mitä jos?”. Ideoinnissa on mahdollista käyttää avainsanalistoja, jonka jälkeen analysoidaan keskeisimpien vaarojen syyt ja seuraukset. Vaarojen tunnistamismenetelmistä eräs yleisimmistä on vioittumis- ja vaikutusanalyysi (VVA), jossa tutkitaan nimensä mukaisesti mahdollisia laitevioista aiheutuvia palovaaroja. Työn turvallisuusanalyysissä (TTA) puolestaan pyritään tunnistamaan työtehtävään tai tekniseen järjestelmään liittyvät palovaaraa aiheuttavat tapahtumat. Onnettomuuksien mallintamismenetelmistä käytetyimpiä lienevät vika- ja tapahtumapuuanalyysit, joista kerrotaan tarkemmin toiminnallisen palomitoituksen työkalujen yhteydessä. (SFPE Engineering 2007, s. 59 – 60, Palukka 2014)

2.3.5.2 Mitoituspaloskenaariot

Järjestelmällisesti muodostetussa uhkien kartoituksessa paloskenaarioiden määrä ja skenaarion tapahtumasarjan pituus voivat kasvaa hyvin suureksi, jolloin ei ole mielekästä mallintaa kaikkia skenaariokokonaisuuksia (tilassa useita syttymislähteitä) ja niistä

muodostettuja yksittäisiä skenaariopolkuja läpikotaisin. Käytettyjä termejä on havainnollistettu esimerkinomaisella tapahtumapuulla kuvassa 2.5, jossa numeroarvojen avulla konkretisoidaan mitoituspalon valinnan logiikkaa ja tapahtumapuun muotoutumista. Mitoituspaloskenaarioiden valinnan perusteena tässä tapauksessa ovat olleet poistumisturvallisuuteen liittyvät tarkastelut ja skenaarioiden todennäköisyydet, jotka ovat aina määriteltävä tapahtumakohtaisesti.



Kuva 2.5. Mitoituspaloskenaarioiden mahdollinen määrittystapa todennäköisyysperusteisesti tapahtumapuumenetelmällä. Tapahtumapuuanalyysi tuottaa skenaariokokonaisuuden, josta voidaan valita useita mitoituspaloskenaarioita.

Mitoitettavien palotapahtumien valinta ei ole skenaarioiden suuresta määrästä ja usein heikoista lähtötiedoista johtuen aina helppoa. Oleellista onkin tunnistaa paloskenaariot, jotka edustavat parhaiten rakennuksen vakavimpia, järjellisiä palouhkia. Esimerkiksi kuvan 2.5 oikean ylänurkan pahinta mahdollista tilannetta ei valita mitoittavaksi palota-

pahtumaksi, koska todennäköisyys skenaarion toteutumiseksi on kyseisessä tarkastelussa liian alhainen.

Tarkasteltavien mitoituspaloskenaarioiden lukumäärä yksittäisessä tilassa ja koko rakennuksessa voi vaihdella riippuen projektille asetetuista tavoitteista, aikataulusta ja budjetista. Mitoituspaloskenario on siis osa yhtä skenaariokokonaisuutta ja sen tarkoituksena on edustaa riskiltään skenaarioiden uskottavinta pahinta tapahtumaa, ei pahinta mahdollista tai keskiarvoa. Keskiarvoisen skenaarion valinta tuottaa epävarmalla puolella olevia tuloksia, kun taas täysin epärealistinen skenario on niin epätodennäköinen, että sen aiheuttamat riskit yleensä vain hyväksytään. Lisäksi ylikonservatiivinen vaihtoehto aiheuttaisi todennäköisesti todella kalliita suunnitteluratkaisuja (Staffanson 2010, s. 7)

Taulukkoon 2.3 on tiivistetty, kuinka paloskenaarioiden kehittäminen ja mitoituspaloskenaarioiden valinta tulisi toteuttaa todennäköisyyksiin perustuvilla lähestymistavoilla. Varsinaisesti suunnitteluratkaisujen toimivuutta ja kelpoisuutta analysoidaan esimerkiksi palosimuloinneilla, jolloin selvitetään pahimpien realististen skenaarioiden seuraukset. Mitoituspaloskenaarioiden valinta voidaan tehdä myös ilman tapahtumataajuuksia, jolloin yksinkertaisesti arvioidaan mahdollisuus kehitetyn skenaarion aiheuttamaan tilanteeseen, jossa hyväksymiskriteerit eivät täyty. Valinta tehdään perustuen suunnittelijan arvioihin, mikä skenario aiheuttaa mahdollisesti suurimman realistisen uhkan paloturvallisuudelle. Valittavia mitoituspaloskenaarioita on vähintään yksi, mutta tarvittaessa erilaisia palon kehittymisiä on hyvä ottaa myös tarkasteluun mukaan. Keskeisin ongelma menetelmässä on löytää hallittava määrä paloskenaarioita, jotka kattavat riittävän laajasti tarkasteltavaa tilannetta koskevat palouhat. (SFPE Engineering 2007, s. 64)

Taulukko 2.3. *Riskiperusteinen paloskenaarioiden kehittäminen ja mitoituspaloskenaarion valinta askel askeleelta pohjautuen standardiin ISO/TS 16733 (Hadjisophopoulos 2008, s. 5-186)*

ISO/TS 16733	Kommentit
1. Palon sijainti	Hahmota tila ja siellä olevat erityiskohdat, joissa palo voi alkaa.
2. Palon tyyppi	Mieti mahdollisen palon syttymissyitä, intensiteettiä ja kasvua.
3. Potentiaaliset palouhat	Tunnista paloskenaariot, jotka voivat tilassa kehittyä.
4. Paloon vaikuttavat laitteistot	Tunnista paloturvallisuuslaitteistot ja niiden ominaisuudet, joilla todennäköisesti on vaikutusta palon kulkuun ja sietämättömien olosuhteiden kehittymiseen.
5. Ihmisten reagointi	Tunnista ihmisten tekemät toimenpiteet, joilla voi olla merkittävää vaikutusta (suosiollinen/heikentävä) palon kulkuun ja savun liikkeisiin.
6. Tapahtumapuu	Rakenna tapahtumapuu, jossa on otettu huomioon palotapahtuman vaihtoehtoinen kulku ja seuraukset syttymisestä paloskenaarion lopputulemaan (sammuminen/täydellinen tuho)
7. Todennäköisyydet	Arvioi jokaisen mahdollisen palotapahtuman esiintymisen todennäköisyyttä (palo/vuosi) hyödyntäen kirjallista tietoa tai suunnittelijan asiantuntemusta.
8. Seuraukset	Arvioi jokaisen mahdollisen palotapahtuman seurauksia ([kuolema/palo] tai [€/palo]) hyödyntäen kirjallista tietoa tai suunnittelijan asiantuntemusta.
9. Riskit	Pisteytä skenaariot riskin ([kuolema/vuosi] tai [€/vuosi]) suuruuden mukaan. Riskiä voidaan arvioida kertomalla skenaarion todennäköisyys sen seurauksilla.
10. Lopullinen valinta ja dokumentointi	Valitse käytetyn arviointimenetelmän perusteella vaarallisimmat paloskenaariot mitoituspaloskenaarioiksi jokaista paloturvallisuustavoitetta kohden. Valittujen skenaarioiden tulisi edustaa suurinta osaa riskien kokonaissummasta.

Edellisten lisäksi mitoituspaloskenaarioiden valinnan perusteena voivat olla myös intressitahojen mielipiteet. Tästä syystä esitietodokumentti (kohta 2.3.7) on tärkeää esitellä ja hyväksyttää toimivaltaisilla viranomaisilla hyvissä ajoin mitoituspaloskenaarioiden

den valinnan jälkeen, jotta mahdollisesti eriävät näkemykset voidaan ajoissa ottaa huomioon.

2.3.5.3 Mitoituspaloskenaarion mallintaminen

Seuraavaksi valitut mitoituspaloskenaariot mallinnetaan, jolloin otetaan huomioon varsinainen mitoituspalo sekä rakennuksen ja tilan käyttäjien ominaisuudet (taulukot 2.4., 2.6 ja 2.7). Mitoituspalon sekä rakennuksen ja käyttäjien ominaisuuksien välillä vallitsee vuorovaikutus, sillä esimerkiksi palon kehittymiseen vaikuttavat niin huonetilan geometria kuin aukotuksetkin, jotka ovat rakennuksen ominaisuuksia. Toisaalta käyttäjien toimintaan vaikuttavat palon ominaisuudet, jolloin esimerkiksi savun tuotto haittaa näkyvyyttä poistuttaessa. Tässä kappaleessa keskitytään pelkästään mallintamistilanteeseen, jossa palontorjuntatoimenpiteiden vaikutusta ei vielä tarkastella.

Mitoituspalo:

Mitoituspalo kuvataan usein palotehon (HRR), palokuorman tiheyden, myrkyllisten kaasujen tuoton ja savuntuoton avulla ajan funktiona. Mitoituspalon sanotaankin olevan yksittäisistä muuttujista tärkein palovaaran suuruuteen vaikuttava tekijä samalla tavoin kuin normaalit kuormitukset ovat rakenteille rakennesuunnittelussa. (Staffanson 2010, s. 7)

Taulukko 2.4. Mitoituspalon rakentuminen. (SFPE Engineering 2007)

Polttoaineet	Mitoituspalokäyrä
- Polttoaineen tyyppi	- Syttyminen
- Polttoaineen määrä	- Kasvuvaihe
- Sijainti ja asettelu	(- Lieskahdus)
- HRR	- Täyden palon vaihe
- Lämmönluovutusnopeus	- Hiipuminen ja sammuminen
- Palamistuotteet	- Kesto

Toiminnallisessa palomitoituksessa paloa ei esitetä standardipalokäyrän keinoin, vaan palon kehitys pyritään esittämään mahdollisimman todenmukaisesti. Mitoituspalon palotehokäyrä koostuu yleensä syttymisvaiheesta, palon kasvuvaiheesta, täyden palon vaiheesta ja hiipumisvaiheesta (kuva 2.6). Lieskahdusta ei tyypillisesti mallinneta, vaan sen tapahtumista arvioidaan simulaatioiden perusteella. (SFPE Engineering 2007, s. 72)

Mitoituspalon määrittämisessä on oleellista arvioida, miten palo kasvaa, kuinka suureksi ja kuinka kauan se kestää. Vapaassa ympäristössä kasvunopeus on hitaampaa kuin huonetilassa, koska avoimessa tilassa palavan kappaleen lähettämä lämpösäteily karkaa ympäristöön. Palon kasvua tulee arvioida aina tila- ja materiaalikohtaisesti. Matemaattisesti palon kehittymisvaihetta pystytään kuvaamaan esimerkiksi t^2 -kasvukäyrän avulla (NFPA 204M 1985)

$$\dot{Q} = at^2, \quad 0 \leq t \leq t_{\infty} \quad (1)$$

missä paloteho kasvaa ajan neliön funktiona. Kerroin α on kasvukerroin [kW/s^2] ja t on aika sekunteina [s]. Kasvukerrointa varioimalla palon kasvunopeutta pystytään säätämään. Palonkehitystä kuvattaessa palo voidaan luokitella neljään ryhmään taulukon 2.5 mukaisesti. Palonkehitys on esimerkiksi nopea, jos palotehon 1055 kW saavuttamiseen kuluva aika t_1 on enintään 150 sekuntia. Tällöin kasvukertoimeksi saadaan 0,047 kW/s^2 yhtälön (1) mukaisesti.

Taulukko 2.5. *Palonkehitysnopeuksien raja-arvoja. (Staffanson 2010, s. 34)*

<i>Palonkehitys</i>	<i>Kasvukerroin, α [kW/s^2]</i>	<i>Aika [s], jolloin paloteho 1055 kW saavutetaan</i>
Hidas	0,003	600
Normaali	0,012	300
Nopea	0,047	150
Erittäin nopea	0,188	75

Maksimipalotehon suuruus riippuu saatavilla olevan hapen ja polttoaineen määrästä, jolloin puhutaan happi- tai polttoainerajoitteisesta palosta. Polttoaineen lämmittäminen rikkoo materiaalin molekyylirakenteen vapauttaen kaasumaisia pyrolyysituotteita, jotka reagoivat hapen kanssa. Palavan aineen määrän rajoittamassa palossa maksimipalotehon suuruus riippuu yhtälön (2) mukaisesti polttoaineen massan palamisnopeudesta \dot{m}_{fi} [kg/s] sekä täydellisestä palamislämmöstä H_c [kJ/kg].

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_{fi} \chi H_c \quad (2)$$

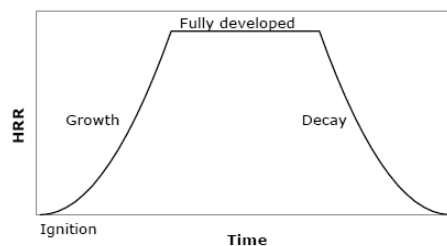
Materiaalin täydellistä palamislämpöä pystytään mittaamaan pommikalorimetrillä, missä korkeapaineisessa happirikastetuissa olosuhteissa materiaali palaa lähes täydellisesti, jolloin ei synny epätäydellisen palamisen tuotteita (esimerkiksi hiilimonoksidi ja häkä). Todellisessa palossa pommikalorimetrin kaltaiset olosuhteet eivät kuitenkaan ole mahdolliset, vaan ainoastaan 60 - 80 % materiaalin palokaasuista palaa täydellisesti. Epätäydellinen palaminen otetaan huomioon pienennyskertoimella χ , jonka suuruus vaihtelee välillä 0,6 - 0,8. (Karlsson 1999, s. 39) Vaihtoehtoisesti palavan aineen määrän rajoittamaa paloa voidaan arvioida polttoaineelle ominaisen yksikköpinta-alaa kohden vapautuvan palotehon [kW/m^2] ja palavan pinta-alan [m^2] avulla, jos näille tekijöille pystytään määrittämään perustellut arvot. (Hietaniemi 2007b, s. 20)

Happirajoitteisessa palossa maksimipalotehon suuruus riippuu saatavilla olevan hapen määrästä. Tilassa riittää happea palon alkuvaiheessa, mutta palon edetessä happipitoisuus laskee ja palo voi tukahtua, ellei palotilaan kulkeudu happea ulkopuolelta. Raja-happipitoisuus paloille on noin 10 – 15 %. Palo saa lisähappea muista tiloista virtaavasta ilmasta, ilmanvaihdosta, savunpoistolaitteistoista, rakennuksen epätiiveyksistä sekä palon aikana syntyvistä aukoista. (Hietaniemi 2008b, s. 19) Vapaan ilman virtaus johtuu tilan ulko- ja sisäpuolella vallitsevien tiheyserojen aikaansaamien paine-erojen vuoksi. Massavirtaa pystytään arvioimaan kaavojen (15) ja (16) avulla, jolloin tehdään yleensä

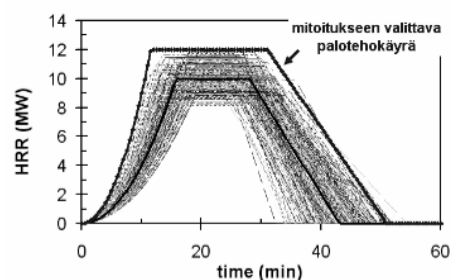
yksinkertaistus yhtäläisestä sisään tulevan massavirran suuruudesta verrattuna ulos kulkeutuvaan massavirtaan. Palossa vapautuu lämpöä noin 13100 kJ, kun 1 kg happea palaa. Ilman happipitoisuuden ollessa 23 % vapautuva lämpö on siten noin 3000 kJ/kg. Lisäksi, kun tilaan virtaavan ilman määrä pystytään laskemaan, saadaan selville arvio suurimmasta palotehosta [kW] (Walton 2008b, s. 3-206)

$$\dot{Q}_{max} = 3000\dot{m}_{in} = 3000 \cdot 0,5A_0\sqrt{H_0} \quad (3)$$

missä sisään tulevan ilman massavirtaa \dot{m}_{in} pystytään arvioimaan esimerkiksi niin kutsutun ilmanvaihtokertoimen avulla, jonka kehitti Kawagoe 1950 -luvulla. Ilmanvaihtokertoimen suuruuteen vaikuttavat tiloissa olevien aukkojen yhteenlaskettu pinta-ala A_0 [m²] sekä aukkojen keskimääräinen korkeus H_0 [m]. Yhtälöstä havaitaan, että aukkojen koon kasvaessa tilassa olevan palon maksimipaloteho kasvaa, koska sisään virtaavan ilman määrä kiihdyttää pyrolyysissa vapautuvan kaasun massan syntymisnopeutta. Kawagoen malli pätee tapauksiin, joissa kaasun lämpötila on vähintään kaksi kertaa korkeampi kuin ympäristön lämpötila (Kelvineinä) ja tilan lämpötilajakauma on suhteellinen tasainen koko tilavuudessa. Tästä syystä laskentakaava sopii erityisesti lieskahduksen jälkeisiin olosuhteisiin. (Karlsson 2000, s. 100) Lisäksi menetelmä sopii parhaiten tiloihin, joissa aukot ovat koko tilaan nähden kohtuullisen kokoisia. Suurempien aukkojen tapauksessa (esimerkiksi koko seinä) ilmanvaihtokerroin yliarvioi aukkovirtauksen suuruuden vaikutuksen palotehoon, jolloin maksimipalotehon arvioinnissa on syytä käyttää tarkempia laskentakaavoja tilan ja ulkoilman välisen massavirran laskemiseksi. (Yli 2007, s. 211)



Kuva 2.6. Mitoituspalokäyrän yleinen muoto (Staffanson 2010)



Kuva 2.7. Mitoituspalon valinta suuresta määrästä laskennallisesti tuotettuja vaihtoehtoja. (Hietaniemi 2007b)

Täyden palon vaiheen jälkeen palon eteneminen jatkuu hiipumis- ja sammumisvaiheella, jotka voivat tapahtua joko hapen tai polttoaineen loppuessa, tai palokunnan, alkusammutuksen tai aktiivisen sammutusjärjestelmän toimesta. Rakenteiden kestävyys-tarkasteluissa palon koko ajanjakso on oleellinen, kun taas poistumissimulaatioiden mallinnuksessa riittää useimmiten henkilöiden turvallinen poistuminen ennen täyden palon vaihetta. Mahdollisten palosammutuslaitteiden vaikutus on myös otettava huomioon palotehokäyrän muodossa. Tarkasteltaessa palon leviämistä huoneesta/palokuormapesäkkeestä toiseen palotehokäyrä puolestaan rakentuu useasta yksittäi-

sestä mitoituspaloista. (SFPE Engineering 2007, s. 72) Toiminnallisen paloteknisen suunnittelun osatekijät ja niiden riippuvuudet on esitetty kuvassa 2.8, jossa on kiinnitetty huomiota myös suunnitteluratkaisujen vaikutus mitoituspaloon.

Mitoituspalokäyrän mallintaminen voi perustua alan kirjallisuuteen, polttokokeisiin tai teoriaan perustuviin laskentakaavoihin. Näiden lisäksi palon mallinnuksessa on myös mahdollista hyödyntää stokastisia laskentatapoja, kuten esimerkiksi Monte Carlo -simulointia, joka on laskentatekninen keino ottaa huomioon epävarmuutta sisältävien suureiden vaikutus mitoituspaloon. Monte Carlo -menetelmässä ohjelmaan sisällytettävien kaavojen laskenta toistetaan tuhansia kertoja siten, että kullakin laskentakerralla syötemuuttujat valitaan satunnaisesti niitä kuvaavista jakaumista. Tuloksena saadaan suuri joukko palotehokäyriä, joista mitoituspalokäyräksi valitaan tilanne, joka kattaa likimain 100 % todennäköisyydellä mahdolliset toistojen tuottamat muodot kuvan 2.7 mukaisesti. (Hietaniemi ym. 2002, s. 31)

Tilojen ominaisuudet:

Tyypillisiä tilojen ominaisuuksia ovat rakennuksen rakenteet, irtaimisto, paloturvallisuuslaitteet sekä sisäiset ja ulkoiset alkuolosuhteet. Tilojen ominaisuuksilla voidaan vaikuttaa ihmisten evakuointiin, palon kehittymiseen ja leviämiseen sekä palamistuotteiden (savu, myrkylliset kaasut, noki) liikkeisiin. (SFPE Engineering 2007, s. 66 - 69) Mallinnuksessa tärkeintä on kiinnittää huomiota analyysissä tarvittaviin paloturvallisuuden kannalta oleellisimpiin asioihin. Merkittävistä oletuksista tulee lisäksi tehdä herkkyystarkastelut.

Taulukko 2.6. Tiloista tarvittavia tietoja mitoituspaloskenaariota varten. (SFPE Engineering 2007)

Arkkitehtoniset ominaisuudet	Rakennesosat	Paloturvallisuuslaitteet
<ul style="list-style-type: none"> - Rakennuksen ja tilojen geometria - Sisäpintojen syttyvyys ja materiaaliominaisuudet - Muiden rakennusmateriaalien ominaisuudet - Aukkojen (ovet, ikkunat) sijainti ja koko - Piilotilat - Palo-osastojen liittyminen toisiinsa - Rakennuksen sijainti tontilla muihin rakennuksiin ja omaisuuteen nähden 	<ul style="list-style-type: none"> - Kantavien rakenteiden sijainti ja koko - Rakennesien materiaaliominaisuudet - Rakenteita suojaavat materiaalit - Suunnittelukuormien vaikutus 	<ul style="list-style-type: none"> - Ilmaisimet herkkyyksineen - Palokellot - Sammutuslaitteet - Savunpoisto
	Poistumisreitit	Muu talotekniikka
	<ul style="list-style-type: none"> - Käytäväleveydet, kapasiteetti - Poistumista hidastavat tekijät 	<ul style="list-style-type: none"> - Ilmastointilaitteiden toiminta - Muut laitteet ja automatiikka
Ympäristötekijät	Palo- ja pelastustoimen käytettävyyks	Palokuorma
<ul style="list-style-type: none"> - Sisä- (ja ulkoilman) alkulämpötila ja suhteellinen kosteus - Virtaukset/tuuliolosuhteet 	<ul style="list-style-type: none"> - Sammutustoiminnan aloituksen riipeys 	<ul style="list-style-type: none"> - Palokuormalaskelmat
	Vuorokaudenajan vaikutus toimintaan	

Ihmisten ominaisuudet:

Ihmisen käyttäytymisen tunteminen on tarpeen henkilöturvallisuuteen liittyvissä tarkasteluissa. Mahdollisiin toimenpiteisiin, joita ihminen tekee havaitessaan palon, tulee kiinnittää huomiota. Lisäksi ihmisten ikä, liikkumiskyky ja ympäristön ärsykkeet voivat ratkaisevasti vaikuttaa evakuoinnin onnistumiseen. (Bryan 2008, s. 3-320) Taulukkoon 2.7 on listattu poistumisen mallintamisen yhteydessä huomioon otettavia asioita.

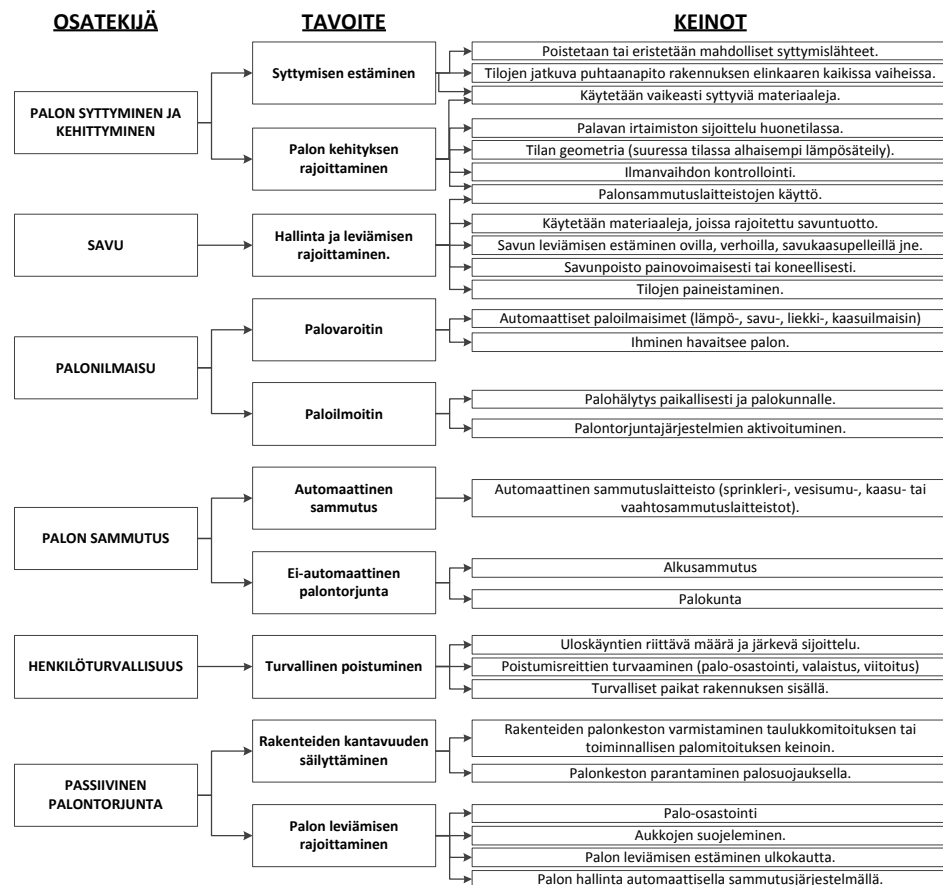
Taulukko 2.7. Tilan käyttäjien mallintamisessa huomioon otettavia asioita. (SFPE Engineering 2007)

Tilojen käyttäjät	
- Havainnointi	- Henkilömäärä
- Reagointikyky	- Jakautuminen ja aktiviteetti
- Liikkumisnopeus	- Poistumisvirta
- Haitallisille kaasuille altistuminen	- Liikkumiskyky
- Tilojen tunteminen	- Ikä, sukupuoli jne.

2.3.6 Suunnitteluratkaisut

Suunnitteluratkaisuilla pyritään saavuttamaan projektin tavoitteet. Jotta tavoitteisiin päästään, ehdoton edellytys suunnitteluratkaisujen hyväksymiselle on hyväksymiskriteerien täyttyminen ottaen samalla huomioon ratkaisun käyttökelpoisuus, hinta, luotettavuus ja koko elinkaari. Tässä kappaleessa tuodaan tarkemmin esille, millaisia vaihtoehtoja suunnitteluratkaisu voi pitää sisällään.

Taulukko 2.8. Suunnitteluratkaisuun vaikuttavia tekijöitä. (muokattu SFPE Engineering 2007, s.87 – 99)

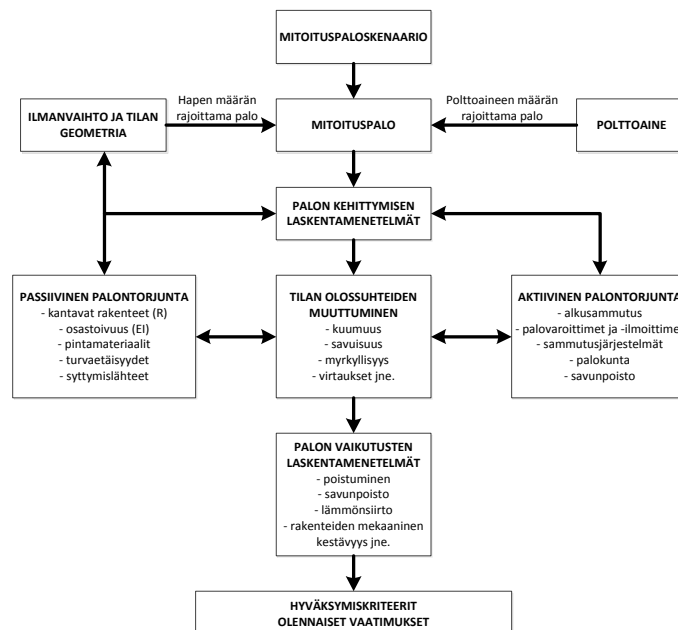


Kokonaispaloturvallisuuden muodostavat osakokonaisuudet on otettava huomioon paloskenaarioissa tarkasteltaessa palamisprosessia ja sen vaikutuksia ihmisille ja omaisuudelle. Uhkakuvien muodostamisessa otettiin jo osittain huomioon paloturvallisuuden

strategioita (kuva 2.5), joilla voidaan saavuttaa tavoiteltava turvallisuustaso, joten suunnitteluratkaisujen kehittäminen on itse asiassa jatkuva prosessi projektin aikana. Käytännössä paloturvallisuutta parantavat menetelmät on otettu esille yhteistuumin tilaajan kanssa jo paloturvallisuustavoitteita määritettäessä. (Hurley 2008, s. 3-446)

SFPE Engineering (2007) listaa kuusi osatekijää, joita voidaan tarkastella mietittäessä suunnitteluratkaisuja taulukon 2.8 mukaisesti. Palon syttymisen ja kehittymisen ehkäisemisellä pyritään palon syttymisen todennäköisyyden pienentämiseen sekä palon, savun ja lämmön kehityksen rajoittamiseen. Palovaroittimet ja -ilmoittimet pyrkivät varoittamaan tilojen käyttäjiä ja pelastushenkilökuntaa palosta mahdollisimman aikaisin sekä joissain tapauksissa aktivoivat muita järjestelmiä, kuten sammutuslaitteistoja. Henkilöturvallisuuden keinoilla pyritään turvalliseen poistumiseen ja passiivinen paloturvallisuus tähtää rakenteiden kestävyys sekä palon leviämisen rajoittamiseen. Kaiken kaikkiaan tyypillisesti komponenteilla pyritään palon vaikutusten ja koon kontrollointiin, jolloin hallitaan palon aiheuttamia vaaroja rakennukselle ja henkilöstölle. (ABS 2010, s. 45)

Suunnitteluratkaisuja haettaessa voidaan käyttää sellaisia rakenneratkaisuja ja järjestelmiä, jotka ovat määräysten asettamien minimiarvojen mukaisia. Esimerkiksi palo-osastointi tai paloilmoitin- ja sammutusjärjestelmät suunnitellaan niille soveltuvien määräysten ja suunnitteluohjeiden mukaisesti. Usein suunnitteluratkaisu kuitenkin vaatii kokeilemaan vaihtoehtoisia ratkaisuja taloudellisista ja käytännöllisistä syistä. (Nystedt 2012, s. 4) Tällaisia suunnitteluratkaisuja ovat esimerkiksi savunpoistojärjestelmät tai kantavien rakenteiden palosuojaus. Osatekijöitä voidaan arvioida erikseen, mutta niiden yhteistoimintaa on myös tarvittaessa tarkasteltava, jos ne olennaisesti vaikuttavat mitoituspaloskenaarion kulkuun. (SFPE Engineering 2007, s. 84) Tästä esimerkkinä ovat sprinklerit, joiden laukeaminen vaikuttaa savun kulkeutumiseen.



Kuva 2.8. Toiminnallisen paloteknisen suunnittelun tärkeimmät osatekijät ja niiden välinen riippuvuus. (muokattu Hietaniemi 2007b, Staffanson 2010)

Kun kaikki edellä mitoituspaloskenaariosta mainitut toiminnallisen paloteknisen suunnittelun palat yhdistetään, saadaan kuvan 2.8 mukainen kaavio, josta on havaittavissa osatekijöiden jatkuva vuorovaikutus keskenään.

2.3.7 Esitietodokumentti

Esitietoasiakirjan tarkoituksena on dokumentoida toiminnallisen palomitoituksen tarvittavat lähtötiedot ja auttaa saavuttamaan suunnittelijan ja muiden osapuolien välinen yhteisymmärrys keinoista suunnitteluongelman ratkaisemiseksi ennen varsinaisen analyysin aloittamista. Samalla ehkäistään mahdolliset väärinymmärrykset myöhemmässä vaiheessa, jos ratkaisun saavuttamisessa aiheuttaa ongelmia. Esitietodokumentti on hyväksyttävä tilaajalla ja toimivaltaisilla viranomaisilla. Yhteisymmärryksen saavuttamiseksi edellä mainittuja osapuolia tulee informoida heti projektin alusta lähtien ja jatkuva yhteistyö heidän kanssaan on suotavaa. Jos toimivaltaisilla viranomaisilla ei ole riittävästi asiantuntemusta dokumentin arvioimiseksi, se voidaan määrätä tarkastettavaksi kolmannelle osapuolelle.

Taulukko 2.9. *Esitietodokumentin sisältö (SFPE Engineering 2007, s. 131)*

Esitietodokumentin sisältö		
- Soveltamisala	- Turvallisuusvelvoitteet	- Merkittävät oletukset
- Projektin osapuolet	- Turvallisuustavoitteet	- Merkittävät suunnittelun ominaispiirteet
- Osapuolten pätevyydet	- Hyväksymiskriteerit	- Tulosten arviointimenetelmät
- Yleistiedot projektista	- Mitoituspaloskenaariot	- Lähdekirjallisuus
- Kuvaus rakennuksesta ja siellä olevista ihmisistä	- Yksi tai useampi suunnitteluratkaisu	- Luettelo aikaisemmin hyväksytyistä asiakohdista

Sisältö voi olla luonteeltaan joustava riippuen suunnittelutarpeista, joten kaikkia taulukossa 2.9 listattuja asioita ei ole tarpeen mainita esitiedoissa. Taulukossa mainittu rakennuksen kuvaus sisältää tiedot kohteen käyttötavasta, palokuormista ja syttymislähteistä. Kaikki valitut arvot oletuksineen tulee olla hyvin perusteltuja ja pohjautua yleisesti hyväksyttyyn kirjallisuuteen (RIL, NFPA, INSTA jne.) Esitietodokumentin päivittäminen on tarpeen suunnittelun edetessä, jos uutta tietoa projektista tulee myöhemmin esille. Yleensä dokumentin hyväksyminen tapahtuu esittelytilaisuudessa, josta laaditaan muistio sisältäen merkinnän toimivaltaisen viranomaisen hyväksynnästä. Kun kaikki osapuolet ovat hyväksyneet ehdotetun toteutustavan, varsinainen laskenta ja analysointi voidaan aloittaa. (SFPE Engineering 2007, luku 11)

2.3.8 Suunnitteluratkaisujen kelpoisuus ja lopullisen suunnitteluratkaisu

Suunnitteluratkaisujen arviointiprosessi on luonteeltaan iteroivaa työtä vaatiessa suunnitteluratkaisujen muuttamista, kunnes hyväksymiskriteerit saavutetaan. Samalla puntaroidaan ratkaisun luotettavuutta, käytettävyyttä ja taloudellisuutta. Jos analyysin tulokset eivät täytä hyväksymiskriteerejä tai muuten ratkaisu havaitaan epäkäytännölliseksi, suunnittelussa on palattava prosessin alkuun ja muutettava joko rakennuksen tilajärjes-

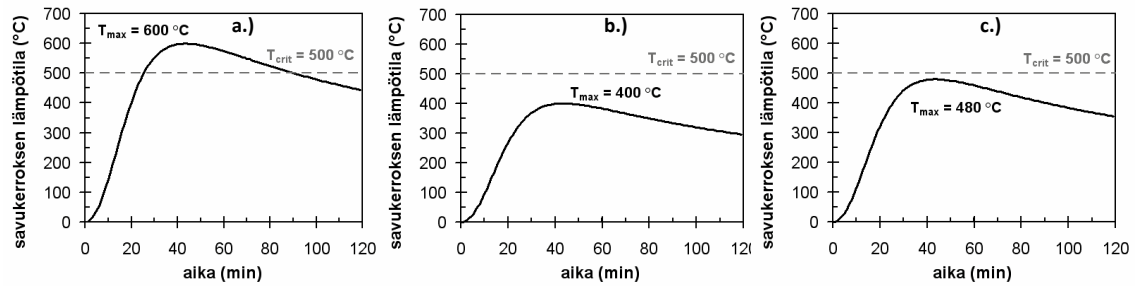
telyjä, käytettäviä materiaaleja, rakennusosia, palontorjunnan laitteistoja tai palokuor-maa. (Kokkala 2000, s. 27) Äärimmäisissä tapauksissa myös paloturvallisuustavoittei-den ja hyväksymiskriteerien uudelleenarviointi on tarpeen, jos kriteerien saavuttaminen vaatii käytännön tasolla mahdottomia tai kalliita suunnitteluratkaisuja. Uudelleenarviointia pyritään kuitenkin välttämään, koska tällöin toiminnallisen palomitoituksen pro- sessilta putoaa pohja, jolloin se käytännössä joudutaan aloittamaan alusta.

Arviointiprosessi voidaan eritellä kahteen osaan (2.3.8.1 - 2.3.8.3). Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan itse arviointi käytännössä joko deterministisesti tai riskianalyytti- sesti. Toisessa vaiheessa arvioidaan epävarmuustekijöitä ja tarvittaessa suoritetaan herkkyystarkasteluja. Arviointityökaluina voidaan käyttää laskentamalleja ja tietoko- neohjelmia, joiden kelpoisuus on osoitettu luotettavaksi. Jos ohjelman tai laskentamallin validointi on puutteellinen, suunnittelijan täytyy osoittaa menetelmän hyväksyttävyy- s viranomaiselle. Laskentamenetelmiä ja kelpoisuuden arviointia on tarkasteltu tarkem- min luvussa 3. (SFPE Engineering 2007, s. 103)

2.3.8.1 Deterministinen tulosten analysointi

Deterministisessä analyysissa paloturvallisuutta arvioidaan mitoituspalo-tilanteen mukai- sen paloturvallisuusratkaisun toimintaa turvallista toimintaa kuvaavaan suureeseen eli hyväksymisarvoon. Lopullinen arviointi suoritetaan vertaamalla suunnittelun tuloksia taulukkomitoituksen mukaiseen referenssirakennukseen tai absoluuttiseen, yksittäiseen numeroarvoon. Kuten edellä on mainittu, hyväksymiskriteerien tulee täytyä herkkyy- s- analyysien puitteissa, jotta suunnitteluratkaisu voidaan hyväksyä. Suunnittelija on vapaa käyttämään tilanteeseen sopivaa menetelmää arvioidakseen paloskenaarioiden seurauk- sia. Eräs esimerkki deterministisestä analyysistä ovat poistumisaikalaskelmat, joissa käytettävissä oleva poistumisaika (ASET) on oltava suurempi kuin vaadittava poistu- misaika (RSET). Samankaltaisia laskelmia voidaan käyttää arvioitaessa esimerkiksi kantavien rakenteiden kriittisiä lämpötiloja tai palon leviämistä lämpösäteilyn vaikutuk- sesta. (Nystedt 2011, s. 34)

Deterministinen analysointitapa on selkeä ja helposti ymmärrettävissä. Menetelmän heikkoutena voidaan kuitenkin pitää sen kykyä arvioida ratkaisun turvallisuutta vähän- kin epäselvissä tilanteissa. Kuvan 2.9 tapauksessa a.) suunnitteluratkaisun tuottama lämpötila ylittää selvästi kriittisen lämpötilan 500 °C, jolloin ratkaisu ei ole millään ta- voin hyväksyttävissä. Tilanteen b.) maksimilämpötila jää selvästi hyväksymiskriteerin alapuolelle, jolloin konservatiivinen suunnitteluratkaisu kelpaa. Sen sijaan tapaus c.) on vaikeasti tulkittava tilanne, koska suunnitteluratkaisun ja kriittisen lämpötilan välillä ei ole selkeää eroa. (Hietaniemi 2007b, s. 51)



Kuva 2.9. Esimerkki deterministisestä paloturvallisuusvaatimuksen toteutumisen arvioinnista, jossa huonetilaan muodostuvan savukerroksen lämpötilaa verrataan tilan lieskahtamiseen johtavaan lämpötilaan, jonka arvioidaan olevan 500 °C (Hietaniemi 2007b, s. 51)

Deterministinen analyysi ei kata keinoja, kuinka suuri hyväksyttävän turvamarginaalin tulee olla vaaralliseksi luokiteltavasta tilanteesta, jolloin suunnittelijan tehtäväksi jää arvioida kokemuksensa perusteella, tuleeko ratkaisu hyväksyä. Myöskään eri skenaarioiden välisiä suhteita, todennäköisyyksiä ja seurauksia ei voida arvioida samalla tavalla tavoin kuin todennäköisyyspohjaisessa analyysissä. (Nystedt 2011, s. 34)

2.3.8.2 Riskianalyttinen tulosten arviointi

Riskianalyttisessa arvioinnissa tarkastelussa arvioidaan tapahtuman todennäköisyyden lisäksi myös vakavuus. Matemaattisesti ilmaistuna riski (R) voidaan määritellä vahingon odotusarvona: (Yung 2008, s. 8)

$$R = P \times C \quad (4)$$

missä P on tapahtuman todennäköisyys ja C on seuraus ilmaistuna ihmishenkien menetyksenä, loukkaantuneiden lukumääränä, omaisuusvahinkoina tai muina mitattavina vahingon suuruutta kuvaavana suureena. Henkilöriskien tapauksessa seurausten vakavuutta voidaan painottaa indeksiin $p \geq 1$ avulla, jolloin otetaan paremmin huomioon useampia uhreja vaativien suuronnettomuuksien seuraukset. (Hietaniemi 2007a, s. 34)

$$R = P \times C^p \quad (5)$$

Jos vahinkoa aiheuttavia tapahtumia on useita, kokonaisriski on yksittäisen riskitulon summa. Riskianalyttinen prosessi noudattaa taulukon 2.3 mukaista järjestystä, jossa suunnitteluratkaisuissa tapahtuu vikaantumisia ja tämä vaikuttaa skenaarioiden todennäköisyyksiin ja seurauksiin. Tapahtumapuuanalyysin sijaan voidaan riskien kartoituksessa käyttää myös erilaisia tarkastuslistoja. Tapahtumaketjujen seurauksien vakavuutta arvioidaan palosimuloinneilla, jonka jälkeen pystytään arvioimaan kyseiseen tapahtumaketjuun liittyvä riski. Riskianalyttinen tulosten arviointi voi perustua joko kvalitatiiviseen tai kvantitatiiviseen riskiarviointiin.

Kvalitatiivinen riskinarviointi

Kvalitatiivinen riskinarviointi on menetelmä, jossa riskinarviointi voi sisältää numeerisia arvoja tai matemaattisia menetelmiä, mutta lopputulos ilmoitetaan kuitenkin sanallisesti. Menetelmää käytetään usein karkeaan paloriskien arviointiin, jossa otetaan huomioon palotorjuntatoimenpiteet riskien minimoinnissa. Nimensä mukaisesti arviointi toteutetaan laadullisin termein, kuten ”vähäinen”, ”kohtalainen” tai ”merkittävä riski”. Näitä kutsutaan riskiluokiksi. Kvalitatiivisessa riskinarvioinnissa työkaluna voi olla esimerkiksi riskimatriisi, joka on myös mahdollinen kvantitatiivisen riskinarvioinnin keino. Riskimatriisi on kooltaan vähintään 2 x 2, jossa todennäköisyyden taso ilmoitetaan vaakarivillä ja seurausten vakavuus pystysarakkeella. Riskin taso ja edelleen riskiluokka arvioidaan perustuen tapahtuman todennäköisyyden suuruuteen ja seurausten vakavuuteen. Riskimatriiseista on olemassa erilaisia malleja ja erilaisilla sanamuodoilla tehtynä. Esimerkki kvalitatiivisin keinoin rakennetusta riskimatriisista on esitetty kuvassa 2.10, jossa todennäköisyyden ja seurausten tasot on jaettu viiteen kategoriaan. Esimerkiksi todennäköinen tapahtuma merkittävien seurauksien (lääkintähoito) aiheuttaa merkittävän riskin (oranssi alue), jota ei luultavasti pystytä hyväksymään suunnitteluratkaisuna ilman muutostöimenpiteitä. Tulosten tuottamia riskiluokkia verrataan hyväksyttävään riskitasoon, joka on määritetty aikaisemmin hyväksymiskriteereissä. Riskimatriisia voidaan käyttää sekä henkilö- että omaisuusvahinkoriskien analysointiin. (Yung 2008, luku 4)

		SEURAUS					TODENNÄKÖISYYSTASO	Kuvaus
		MITÄTÖN	PIENI	MERKITTÄVÄ	SUURI	KATASTROFAALINEN		
TODENNÄKÖISYYS	MELKEIN VARMA				Sietämätön riski		Melkein varma	Odotetaan tapahtuvan useimmissa tapauksissa.
	TODENNÄKÖINEN			Merkittävä riski			Todennäköinen	Esiintyy todennäköisesti joskus.
	MAHDOLLINEN		Kohtalainen riski				Mahdollinen	Todennäköisesti ei esiinny, mutta on mahdollinen.
	EPÄTODENNÄKÖINEN	Vähäinen riski					Epätodennäköinen	Esiintyminen hyvin epätodennäköistä.
	ERITTÄIN EPÄTODENNÄKÖINEN						Erittäin epätodennäköinen	Lähes mahdoton ja tapahtuu ainoastaan poikkeuksellisisissa olosuhteissa.
							SEURAUSTEN TASO	
							Katasrofaalinen	Kuolema, erittäin suuri taloudellinen tappio.
							Suuri	Vakava loukkaantuminen, suuri taloudellinen tappio.
							Merkittävä	Lääkintähoitoa tarvitseva, merkittävä taloudellinen tappio.
							Pieni	Ensi-apuhoito riittää, pienehkö taloudellinen tappio.
							Mitätön	Ei loukkaantumisia, merkitykseton taloudellinen tappio.
							RISKILUOKKA	
							Sietämätön riski	Ei hyväksyttävissä missään olosuhteissa, välittömät toimenpiteet.
							Merkittävä riski	Ei hyväksyttävissä, toimenpiteitä tarvitaan.
							Kohtalainen riski	Hyväksyttävissä riskienhallinnan keinoin, toimenpiteitä tarvitaan.
							Vähäinen riski	Hyväksyttävä, ei toimenpiteitä.

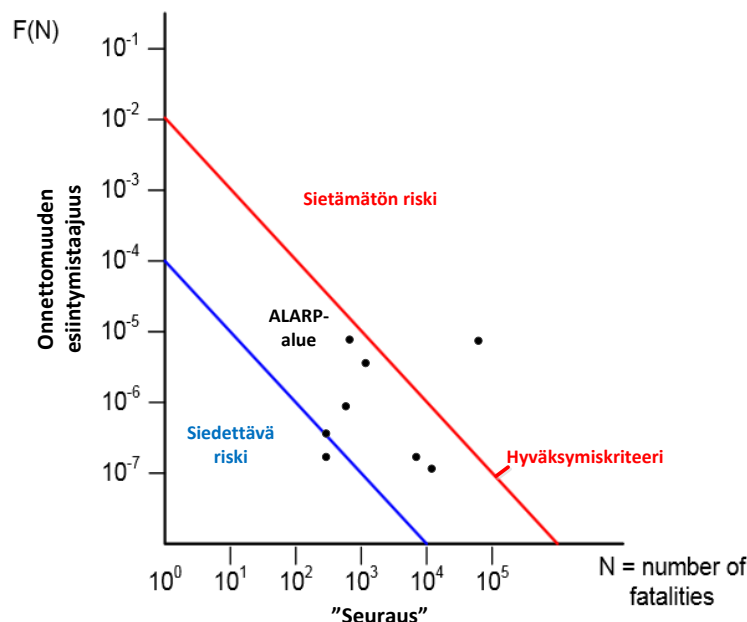
Kuva 2.10. Riskimatriisi kvalitatiivisesti (Yung 2008, s. 34)

Kvantitatiivinen riskinarviointi

Kvantitatiivisessa riskinarvioinnissa sekä todennäköisyyksille että seurauksille määritetään numeeriset arvot, joiden avulla myös riskille saadaan kvantitatiivinen arvo. Riskinarviointia voidaan suorittaa esimerkiksi riskimatriisin, F-N -käyrän avulla tai vertaillevan riskianalyysin avulla, kuten myöhemmin tässä tutkimuksessa tehdään. Riskimatriisin tapauksessa tilanne ei poikkea kuvan 2.10 mukaisesta kvalitatiivisesta tapauksesta muuten kuin, että todennäköisyyksillä on sanallisten kuvausten sijaan tapahtumataajuus (palo/vuosi) ja seuraukset ilmoitetaan henkilö- (kuolema/palo) tai omaisuustappioina

(€/palo) numeerisesti. Todennäköisyydet ja seurausten taso pisteytetään 5 x 5 matriisiin tapauksessa 1 – 5 ja näiden tulo määrittää riskiluvun (1 – 25), jota verrataan projektin osapuolten yhteisesti määrittämään hyväksyttävään riskitasoon. (SFPE Engineering 2007, s. 112 – 114)

Toinen hyödyllinen menetelmä kvantitatiivisessa riskinarvioinnissa on F-N -käyrä (Frequency - Number), jonka avulla voidaan vertailla eri suunnitteluratkaisuja keskenään. F-N -käyrä soveltuu pääasiassa henkilöriskien arviointiin, jolloin se esittää kumulatiivisesti onnettomuuksien esiintymistaajuuden riippuvuuden uhrien lukumäärästä. Omaisuusvahinkojen arviointi on myös mahdollista, jolloin tarkastelu hyväksymiskriteereineen tehdään taloudellisesta näkökulmasta vastaavin toimenpitein. (RIL 221 – 2003, s. 74) Yksinkertaistetusti F-N -käyrän ideana on, että esimerkiksi viisi yksiuhrista paloa on ”hyväksyttävämpää” kuin yksi palo, jossa on viisi uhria. Taajuus voidaan ilmaista vuosittaisena esiintymistaajuutena tai onnettomuutta kohden laskettuna arvona. Laskelmien tulokset sijoitetaan kuvaajaan, josta arvioidaan hyväksymiskriteerien täyttyminen. Jos kaikki pisteet ovat siedettävän riskitason (hyväksymiskriteeri) alapuolella, suunnitelma voidaan hyväksyä sellaisenaan ilman jatkotoimenpiteitä. Yhdenkin pisteen sijainti sietämättömän riskitason yläpuolella tuottaa hylätyn suunnitteluratkaisun, kuten käy kuvassa 2.11. Jos laskettuja pisteitä sijaitsee ALARP -alueella (As Low As Reasonably Practicable), suunnitelma on hyväksyttävissä, mutta sen parantamista tulee harkita. (Hietaniemi 2007b, s. 57)



Kuva 2.11. *F - N -käyrän käyttö riskianalyttisessä tulosten arvioinnissa.*

Riskianalyttisessä tulosten analysoinnissa on monia etuja verrattuna deterministiseen lähestymistapaan. Menetelmä antaa työkalun eri perustein suunniteltujen rakennusten keskinäiseen vertaamiseen järjestelmällisesti. Lisäksi sillä otetaan huomioon järjestelmien pettämismahdollisuudet seurauksineen, mutta samalla pienentäen tapahtuman todennäköisyyttä. Analyysseissa voidaan käyttää lähtöarvoina jakaumia yhden edustavan

arvon sijaan, mutta tarvittaessa kuitenkin absoluuttistakin hyväksymisrajaa pystytään rajallisissa tapauksissa käyttämään. (RIL 221 – 2003, s. 74) Riskianalyttiset menetelmät ovat kuitenkin aikaa vieviä ja erittäin vaativia suunnittelukokonaisuuksia, joten menetelmän tarpeellisuutta on aina tarpeen tarkastella projektikohtaisesti.

2.3.8.3 Epävarmuus ja herkkyysanalyysit

Suomen Rakentamismääräyskokoelman E1 (2011) mukaan toiminnallisen palomitoituksen laskelmien tuloksista on tehtävä herkkyysanalyysit. Niiden tarkoituksena on arvioida laskelman parametrien muutosvaikutusta lopputulokseen. Herkkyysanalyysi on riskien ja epävarmuuden arvioimista varten ja se on yhtä oleellinen osa suunnitelmaa kuin varsinaiset laskelmatkin. (Hietaniemi 2007b, s. 10) Toiminnallisissa tarkasteluissa epävarmuuden selvitys on oleellinen osa prosessia, jotta lopulliseen suunnitelmaan saadaa riittävä turvallisuustaso. (SFPE Engineering 2007, s. 120)

Epävarmuutta aiheuttavat tekijät suunnitteluprosessissa

Epävarmuuden aiheuttajia suunnitteluprosessin aikana on useita, jolloin on tärkeää ymmärtää, millä tekijöillä voi olla merkittävästi heikentävä vaikutus lopulliseen tulokseen. Tyypillisimpiä tekijöitä ovat esimerkiksi laskentamenetelmät, syötetiedot, hilaverkko ja mitoituspalo. Toiminnallisen palomitoituksen tapauksessa käytettävien laskentamenetelmien ja teorioiden soveltuvuus on syytä tunnistaa tapauskohtaisesti, koska laskenta-kaavat ovat aina yksinkertaistettuja oletuksia todellisuudesta. Laskentamenetelmiä käytettäessä tulee tarkastaa reunaehdot, missä rajoissa laskennan tuottamat tulokset ovat järkeviä. (SFPE Engineering 2007, s. 121) Esimerkiksi kaksivyohtymämallissa käytetään approksimaatioita tilan kylmästä ja lämpimästä kerroksesta, vaikka todellisuudessa huoneen koosta ja palon lämmönluovutuksesta riippuen näillä kahdella kerroksella ei ole selkeää rajapintaa.

Syötetietojen epävarmuus voi johtua heikoista lähtötiedoista tai syötearvojen muutoksesta monien tekijöiden funktiona, kuten lämpötila tai aika. Myös laaja vaihteluväli materiaaleissa, komponenteissa, palon kehitymisessä ja ihmisten toiminnassa aiheuttaa epävarmuutta, jolloin syötetiedoissa voidaan käyttää yksittäisen materiaaliparametrien sijaan todennäköisyysjakauman fraktiilia. Lisäksi tärkeimpänä yksittäisenä palovaurion suuruuteen vaikuttavana tekijänä mitoituspalon vaihtelun vaikutus lopputulokseen tulee erityisesti tarkastaa. (Notarianni 2008, s. 5-81)

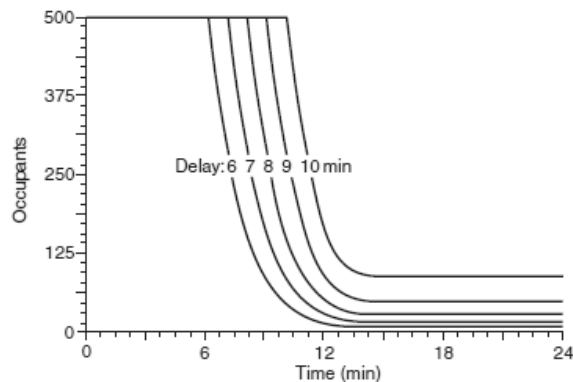
Tietokonepohjaisia laskentamalleja käytettäessä mallin tarkkuus voi mahdollisesti vaikuttaa laskennan lopputulokseen. Virtausmekaniikkaa hyödyntävien laskentamallien tapauksessa (kohta 3.2.3) tämä käytännössä tarkoittaa hilaverkon kokoa. Liian tiheä verkko kuluttaa laskentakapasiteettia tarpeettomasti ja pidentää laskenta-aikaa. Toisaalta karkea hilaverkko voi johtaa numeerisiin virheisiin aiheuttaen tuloksiin ei-hyväksyttävissä olevia poikkeamia. (Jahn 2011, s. 1068) McGrattanin ym. (1998) mukaan palon ominaisläpimitan D^* ja hilaverkon koon suhde tulee olla vähintään 5 – 10 paloalueella, jotta palo tulee mallinnettua oikein. Ominaisläpimita D^* lasketaan kaavasta (6)

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (6)$$

missä \dot{Q} on paloteho (kW) ja g on putoamiskiihtyvyys. Tiheys ρ_0 , ominaislämpökapasiteetti c_p ja lämpötila T_0 ovat ympäröivän ilman olosuhteita. Hilaverkon kokoa muuttamalla tulee tarkastaa, pysyvätkö saadut tulokset hyväksyttävissä olevassa suuruusluokassa. (McGrattan ym. 1998, s. 170)

Epävarmuuden hallintakeinot

Yksinkertainen herkkyysanalyysi on toimiva keino epävarmuuden hallinnassa. Herkkyysanalyysissä tutkitaan kerrallaan yhden (tai useamman) syötetiedon muutoksen vaikutusta lopputulokseen. Tulokset esitetään taulukon tai kuvaajan avulla, jolloin pystytään arvioimaan parametrin herkkyyttä lopputulokseen. Esimerkiksi kuvan 2.12 tapauksessa on tarkasteltu paloilmaisimen viiveen vaikutusta poistumisaikaan. Useamman yhtäaikaisen muuttujan tapauksissa Monte Carlo -laskenta on hyödyllinen menetelmä ottamaan huomioon syötetietojen epävarmuuden. Herkkyysanalyysin avulla pystytään tunnistamaan ne parametrit, joilla on merkittävin vaikutus ennustettuun lopputulokseen. Nyrkkisääntönä Phillips (2002, s. 5-119) toteaa syötetiedon olevan lopputuloksen suhteen herkkä, jos sen muuttaminen +/- 10 % aiheuttaa vähintään yhtä suuren poikkeaman lopputuloksen arvossa. Tyypillisesti parametrit, kuten palon kasvukerroin, paloteho, palokuorma ja palamistuotteiden partikkeliosuudet, ovat herkkyysanalyysissä arvioinnin kohteena. (Staffanson 2010, s. 61)



Kuva 2.12. Herkkyystarkastelu paloilmaisimen viiveen vaikutuksesta tilan käyttäjien poistumiseen. (Phillips et.al. 2002, s. 5-120)

Varmuuskertoimet ja turvamarginaalit ovat myös eräs keino hallita epävarmuutta. Varmuuskertoimen ideana on kertoa suunnitteluratkaisun tuottama tulos tietyllä kertoimella (> 1) ja tarkastaa, että kerrottu arvo on edelleen hyväksymiskriteerien sallimissa rajoissa. Turvamarginaalilla puolestaan arvioidaan alkuperäisen suunnitteluarvon ja hyväksymiskriteerien mukaisen arvon välistä eroa, joka yleensä ilmoitetaan prosentteina. Kiinteiden varmuuskertoimien käyttö soveltuu osin deterministiseen analyysiin, mutta sen käyttö toiminnallisessa palomitoituksessa on kuitenkin varsin ongelmallista, koska

laskelmat, lähtöarvot ja analysoitavat parametrit eivät ole läheskään aina suoraan verrannollisia lopputulokseen. Esimerkiksi poistumisaikalaskelmien suorittaminen kaksinkertaistamalla mitoittava paloteho ei tarkoita automaattisesti sitä, että varmuuskerroin turvalliselle poistumiselle olisi kaksi, koska voimakkaampi palo aktivoi paloilmomoittimet ja sprinklerit toimimaan normaalia aikaisemmin. (Notarianni 2008, s. 5-84)

2.3.9 Dokumentointi

Kun tarvittavat tarkastelut on suoritettu, on tarpeen tehdä läpikotainen selvitys tehdyistä toimenpiteistä, joilla lopputulos on osoitettu turvallisiksi. Dokumentointiin kuuluvat mm. tilojen käyttö, tehdyt oletukset, selvitykset tarkasteluista, saaduista tuloksista ja loppupäätelmistä niin, että muut projektin osapuolet, erityisesti toimivaltaiset viranomaiset, voivat sitä ymmärrettävästi tarkastella. Tarvittaessa kolmas osapuoli tarkistaa suoritettut tarkastelut. Lisäksi dokumentit toimivat asiakirjana myöhemmissä tilanteissa, jos suunnitelmia muokataan tai paloon tarvitaan tarkentavia analyysejä. (Hurley 2008, s. 3-449) Tässä yhteydessä dokumenteilla tarkoitetaan toiminnallisen tarkastelun tulosedokumenttia, mahdollisia erityisselvityksiä, piirustuksia sekä käyttö- ja huolto-ohjeita.

2.3.9.1 Toiminnalliset tarkastelun tulosedokumentti

Toiminnallisen tarkastelun tulosedokumentti on pakollinen osa rakennuslupamenettelyä, jolloin se on liitettävä rakennuslupa-asiakirjoihin. Tällöin toiminnallisen tarkastelun asiakirjoista tulee vähintään ilmetä (E1 2011, 1.3.2)

- ❖ rakennusten ja siinä olevien paloturvallisuuslaitteiden kuvaus;
- ❖ rakennuksen käytöstä koko sen elinkaaren aikana tehdyt oletukset;
- ❖ palokunnan toimintamahdollisuuksista tehdyt oletukset;
- ❖ perusteet tarkastelun kohteiksi valituille palotilanteille;
- ❖ vikaantumistarkastelu tarvittavassa laajuudessaan perusteluineen;
- ❖ rakennuksen käytön aikana edellytettävät huolto- ja kunnossapitotoimet;
- ❖ käytettyjen menetelmien kuvaus, joka sisältää laskenta- ja koemenetelmien soveltuvuuden rajoituksineen sekä lähtötiedot ja tehdyt oletukset perusteluineen;
- ❖ saadut tulokset herkkyyssanalyysineen;
- ❖ saatujen tulosten vertailu hyväksymiskriteereihin;
- ❖ sovellusalueiden yksilöinti ja rajaaminen, mikäli käytetään vaatimusten täyttymisen osoittamisessa sekä oletettuun palonkehitykseen perustuvaa mitoittamista että E1:n mukaisiin määräyksiin perustuvaa mitoittamista.

Yllä mainittujen kohtien käsittelyn yksityiskohtaisuus riippuu analyysin laajuudesta ja rakennuskohteen vaativuudesta. Dokumentoinnin avulla voidaan nähdä jatkossa, millä keinoin suunnitteluratkaisu mahdollisine rajoitteineen on osoitettu turvallisiksi. Toiminnallisen tarkastelun tuloksena on voitu tehdä esimerkiksi päätös kulkuaukkojen au-
kipito- ja sulkeutumistekniikasta, joiden vaatimuksenmukainen toiminta palossa edellyt-

tää käytönaikaista paloturvallisuuden ylläpitoa. Tarvittaessa dokumentista on hyötyä myös myöhemmin, jos on tarvetta osoittaa turvallisuusvaatimuksien täyttyminen muutuneissa olosuhteissa tai rakennuksen muutostöiden yhteydessä. (YO39 2003, s. 42)

2.3.9.2 Muut dokumentit

Erityisselvitykset ja piirustukset kuuluvat toiminnallisen palomitoituksen suunnitteluun projektin laajuudesta riippuen. Jos projektiin soveltamisalaan kuuluu koko rakennuksen palotekninen suunnittelu, piirustukset ja erityisselvitykset kuuluvat suunnittelukokonaisuuteen. (SFPE Engineering 2007, s. 141) Lisäselvitykset liittyvät usein kantavien rakenteiden palomitoitukseen, palon lämpösäteilyn vaikutukseen ja turvaetäisyyksiin, lasirakenteiden kykyyn toimia paloa tai savun leviämistä rajoittavina rakenteina, väliseinissä olevien suurten ovien ja/tai ikkunarakenteiden palonkestävyyteen, tiiveyteen ja lämpösäteilyn läpäisevyyteen tai muihin vastaaviin asioihin. (YO 103 2003, s. 26)

Käyttö- ja huolto-ohjeet edellytetään laadittavaksi Maankäyttö- ja rakennusasetuksessa (66 §) ja se muodostuu rakennushankkeen eri osapuolien laatimista asiakirjoista, jotka kootaan kiinteistön omistajalle luovutettavaksi kokonaisuudeksi. Sen tarkoituksena on olla ”käyttöopas”, jonka avulla voidaan saavuttaa halutut asumisolot, rakenteiden ja laitejärjestelmien suunnitellut käyttöiät sekä hyvä energiatalous järkevästi ja taloudellisesti. Kohteissa, joissa paloturvallisuussuunnittelu perustuu toiminnalliseen palomitoitukseen, käyttö- ja huolto-ohjeeseen tulee sisällyttää pelastussuunnitelmassa edellytetyt toimenpiteet. Tarkemmat säännökset käyttö- ja huolto-ohjeista annetaan Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa A4 (2000). (RIL 221 – 2003)

3 TOIMINNALLISEN TARKASTELUN TYÖKALUT JA LASKENTAMENETELMÄT

3.1 Todennäköisyysanalyysin työkalut

Vika- ja tapahtumapuuanalyysillä on mahdollista selvittää järjestelmien ja niissä olevien komponenttien luotettavuuden kannalta kriittiset pisteet ja muodostaa järjestelmällisesti mahdollisia tilassa tapahtuvia paloskenaarioita. Molemmat menetelmät ovat luotettavuus- ja riskianalyysin perustyökaluja, joita on mahdollista hyödyntää sekä kvalitatiivisesti että kvantitatiivisesti.

3.1.1 Vikapuuanalyysi

Vikapuumenetelmää käytetään analysoitaessa yksittäisistä komponenteista muodostuvien järjestelmien luotettavuutta. Vikapuuanalyysi on tekniikka, joka keskittyy yhteen erityiseen vikaantumistapahtumaan, jossa systemaattisella ja tehokkaalla ”top-down” lähestymistavalla arvioidaan ei-toivotun tapahtuman mahdollisia aiheuttajia. Lopputuloksena on alkutapahtumasta etenevä vikaantumisten hierarkinen sarja, jossa lopulta päädytään joko yksittäisen pienen komponentin tai toiminnon vikaantumiseen tai käyttövirheeseen, joka voi aiheuttaa osajärjestelmän tai koko järjestelmän vikaantumisen. Työkalu on hyödynnettävissä kvalitatiivisesti tai kvantitatiivisesti arvioitaessa palon muodostamia uhkia. Kvantitatiivisessa analyysissä on tarpeen tietää komponenttien vikaantumisen todennäköisyydet, jotta pystytään laskemaan huipputapahtuman todennäköisyys perustapahtumien todennäköisyyksien funktiona. (Meacham 2008, s. 5-209)

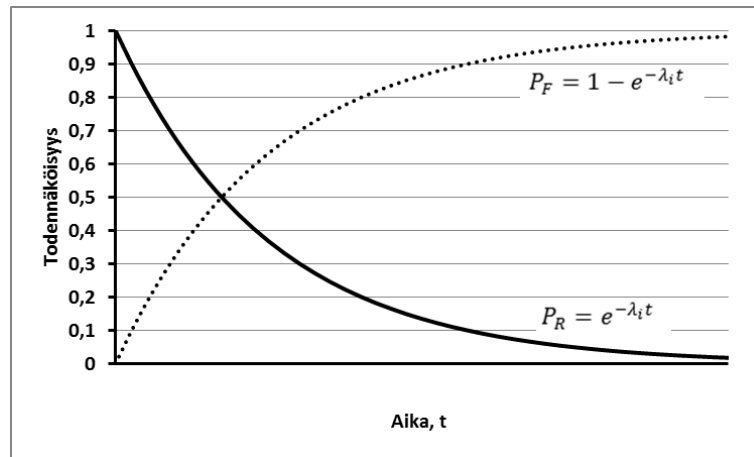
Vikapuun muodostus lähtee käyntiin reunaehdojen ja varsinaisen ongelman eli huipputapahtuman yksikäsitteisellä määrittelyllä. Reunaehdoissa tulisi ainakin määrittää järjestelmän fyysiset rajat, alkutilanteen toiminnot (toiminnan, järjestelmän, komponenttien tila), ulkoisten tekijöiden vaikutus (esimerkiksi sää tai sabotaaasi) ja yksityiskohtaisuuden taso eli kuinka tarkasti vikaantumisen mallinnus suoritetaan. (Heikkilä ym. 2002, s. 15 – 17)

Tämän jälkeen muodostetaan itse vikapuu. Osajärjestelmien vikaantuminen riippuu niihin liittyvien komponenttien keskinäisestä toiminnasta. Yksittäinen järjestelmätaso voi vikaantua, jos kaikki siihen liittyvät komponentit vikaantuvat tai, jos vain yksi komponentti vikaantuu. Laskennallisesti yksittäisen komponentin luotettavuus (P_R) riippuu ajasta (t) ja vikaantumistaajuudesta (λ_i) yhtälön (7) mukaisesti. Vikaantumistaajuus ilmoitetaan vikaantumisten määränä/ ajanjakso. (Yung 2008, s. 214)

$$P_R = e^{-\lambda_i t} \quad (7)$$

Vastaavasti komponentin vikaantumisen todennäköisyys (P_F) ilmoitetaan luotettavuuden komplementtina.

$$P_F = 1 - e^{-\lambda_i t} \quad (8)$$



Kuva 3.1. Eksponentiaalisesti mallinnettu vikaantuminen. (Clemens 1993)

Jokaisella tasolla oleva vikatapahtuma esitetään portteina, joista yleisimmin käytetyt ovat JA- ja TAI -portti. JA -portti sallii vikaantumisen etenemisen ylöspäin vikapuussa vain silloin, kun kaikki siihen liittyvät komponentit vikaantuvat. Todennäköisyys JA -portin (osajärjestelmän) rikkoutumiselle on kaikkien sen alla olevien komponenttien vikaantumisten todennäköisyyksien tulo. (Yung 2008, s. 216)

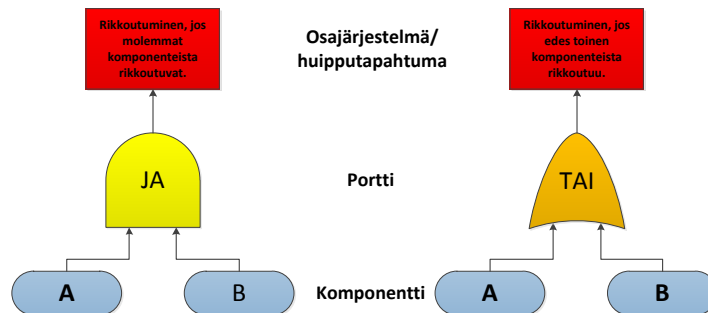
$$P_F[JA] = \prod_{i=1}^n P_F = \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (9)$$

TAI -portti sallii vikaantumisen etenemisen ylöspäin vikapuussa jo silloin, kun yksikin siihen liittyvistä komponenteissa vikaantuu. Todennäköisyysperusteisin termein ilmaistuna TAI -portin vikaantumisen todennäköisyys on kaikkien osajärjestelmän alla olevien komponenttien luotettavuuksien tulon komplementti yhtälön (10) mukaisesti. (Yung 2008, s. 216) Kahden komponentin tapauksessa vikaantumisen todennäköisyys lasketaan käytännössä summaamalla molempien osatekijöiden vikaantumisen todennäköisyys yhteen ja vähentämällä summasta näiden leikkaus. Komponenttien tulee olla toisistaan riippumattomia, jolloin niiden toteutuminen ei vaikuta toisiinsa. (Clemens 1993)

$$P_F[TAI] = 1 - \prod_{i=1}^n P_R = 1 - \prod_{i=1}^n (e^{-\lambda_i t}) \quad (10)$$

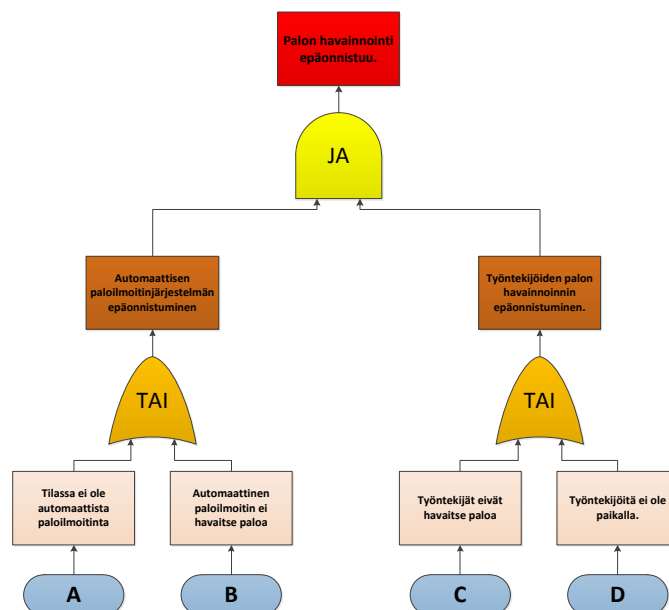
Käsin laskenta rajoittuu yleensä suhteellisen pieniin vikapuutarkasteluihin, koska porttien läpikäyminen vie aikaa. Paloturvallisuuteen liittyvissä vikapuutarkasteluissa komponentin vikaantumisen todennäköisyys on usein vain muutamia prosentteja, jolloin TAI -portin leikkaus jätetään ottamatta huomioon summaamalla yhteen pelkästään vi-

kaantumisten todennäköisyydet. Menetelmää kutsutaan harvinaisen tapahtuman approksimaatioksi, jolloin laskennan virhe on mitätön tuottaen vikaantumiselle varmalla puolella olevan yläraja-arvon. (Joglar 2008, s. 5-65) Esimerkiksi TAI -portin tapauksessa, jossa kahden erillisen komponentin luotettavuus on 0.98, vikaantumisen todennäköisyys lasketaan ”helpommin” $0.02 + 0.02 = 0.04$, kun tarkka tulos on $0.02 + 0.02 - 0.02 \times 0.02 = 0.036 \approx 0.04$. Laajemmissa vikapuutarkasteluissa pyörityksillä voi kuitenkin olla vaikutus lopulliseen tulokseen, joten yksinkertaistuksia on harkittava tapauskohtaisesti.



Kuva 3.2. JA - ja TAI -porttien toimintaperiaate (muokattu Yung 2008, s.216)

Useista komponenteista ja järjestelmätasoisista muodostuu lopulta kokonainen vika-puu, jossa sovelletaan porttien määritelmiä. Rakenteen avulla muodostuu selkeä kuva järjestelmän vikaantumisesta ja sen perusteella tunnistetaan parannusta vaativat kriittiset pisteet. Analyysi voidaan tehdä myös kvalitatiivisesti ilman laskelmia kuvan 3.3 mukaisesti, mutta vikapuun täysi hyöty jää tällöin käyttämättä. Toisaalta kvantitatiivisessa menetelmässä heikkoutena ovat vika- ja häiriödatan epätarkkuus. Lisäksi se on aikaa vievää ja vaatii tekijältään runsaasti ammattitaitoa ja huolellisuutta, sillä ohjelmistot laskevat vikapuuston läpi myös virheellisillä numeroarvoilla. (Heikkilä 2002, s. 28 – 31)



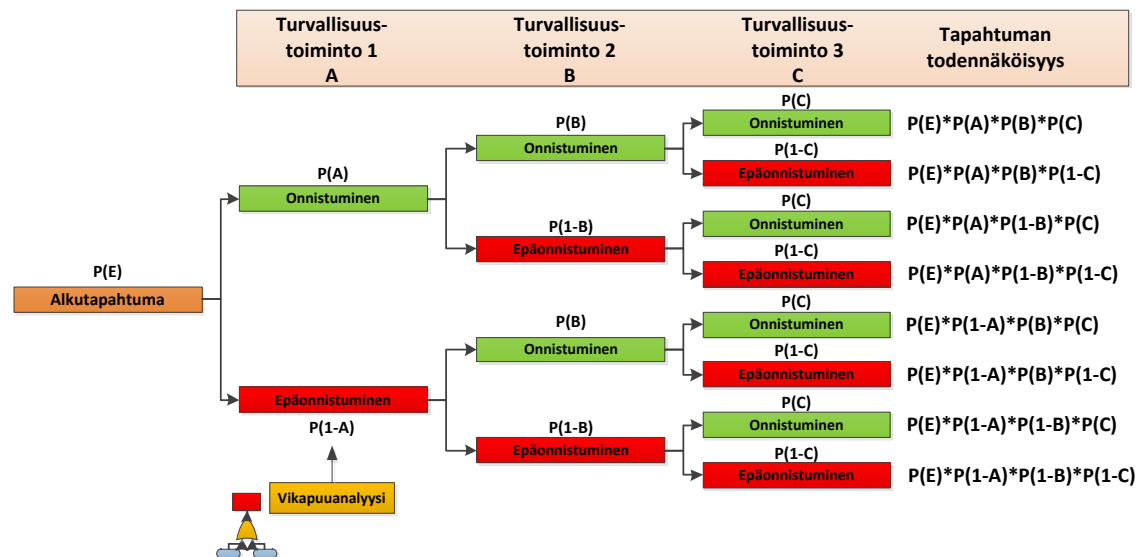
Kuva 3.3. Yksinkertainen kvalitatiivisesti muodostettu vikapuun palon havaitsemisesta työpaikatiloissa.

ELMAS (Event Logic Modeling and Analysis Software) (2011) on eräs esimerkki ohjelmistosta tapahtumien välisten loogisten suhteiden mallinnukseen ja analysointiin. Ohjelmisto tarjoaa kolme erilaista mallityyppiä, joiden avulla pystytään mallintamaan hyvin monimutkaisia tapahtumaketjuja. Käytettävissä olevat mallityypit ovat vikapuu, syy-seurauspuu ja luotettavuuslohkokaavio. Ohjelmistolla luotuja malleja on mahdollista käyttää tiedon jäsentämiseen ja dokumentointiin ja se soveltuu myös työkaluksi stokastiseen simulointiin perustuvaan analysointiin.

3.1.2 Tapahtumapuuanalyysi

Siinä, missä vikapuuanalyysi alkaa vikaantumisella ja tarjoaa mahdollisuuden tutkia potentiaalisia vian aiheuttajia, tapahtumapuuanalyysi on looginen kuvaus tai malli, jolla esitetään kohteena olevaan tapahtumaan liittyvien seurausten loogiset riippuvuudet sarjasta yksinkertaisempia tapahtumia. Analyysin peruslähtökohtana on tunnistaa alkutapahtuma, joka tulipaloissa yleensä on palon syttyminen. Tämän jälkeen tunnistetaan alkutapahtuman todennäköisyyttä alentavat järjestelmät tai strategiat jokaisessa tapahtumapuun haarassa onnistumisen/epäonnistumisen kautta. (Meacham 2008, s. 5-209)

Vikapuuanalyysin tavoin tapahtumapuuanalyysin hyödyntäminen on mahdollista sekä kvalitatiivisin että kvantitatiivisin keinoin. Tapahtuman (skenaarion) todennäköisyys on laskettavissa kuvaukseen sisällytettyihin tapahtumiin liittyvien haarautumistodennäköisyyksien perusteella kuvan 3.4 mukaisesti. Yksittäisten tapahtumapuun haarojen todennäköisyydet puolestaan lasketaan vikapuuanalyysistä tai hyödyntäen vahinkotilastotietoa järjestelmien luotettavuudesta. Tapahtumapuuanalyysissä myös riippuvuuk-sien huomioonottaminen on tärkeää. (Heikkilä 2002, s. 32 - 37)



Kuva 3.4. Tapahtumapuun periaate (muokattu Heikkilä 2002)

Paloteknisessä tapahtumapuuanalyysissä tarkasteltavina tapahtumina voivat olla esimerkiksi palon leviäminen, paloilmioittimen ja sammutusjärjestelmän toiminnan on-

nistuminen, savunpoisto, palo-osastointi tai palokunnan sammutustoiminnan onnistuminen. Mitä enemmän tarkasteltavia palasia analyysiin otetaan mukaan, sitä monimutkaisempi tapahtumapuusta muodostuu. (Yung 2008) Esimerkki jo suhteellisen monimutkaisesta tapahtumapuusta esitettiin kuvassa 2.5, jossa kvantitatiivisesti otettiin huomioon alkusammutuksen, paloilmoittimen, sprinklerijärjestelmän, osastoinnin ja savunpoiston vaikutus tapahtumien kulkuun.

Tapahtumapuuanalyysia hyödynnetään esimerkiksi etsittäessä potentiaalisesti vaarallisia paloskenaarioita ja lopulta mitoituspaloskenaarioita. Kuten jo aikaisemmin todettiin, mitoituspaloskenaarioiksi ei välttämättä valita kaikkein epätodennäköisintä vaihtoehtoa, koska riskinäkökulmasta katsottuna sen toteutumiselle on liian pieni tapahtumataajuus verrattuna seurausten vakavuuteen. Tapahtumapuuanalyysi on siis olennainen osa riskianalyysia, jossa sen käyttökohde on tapahtumatodennäköisyyksien kartoitus. Seuraukset selvitetään seurausanalyysin laskentamenetelmillä.

3.2 Seurausanalyysin laskentamenetelmät

Toiminnallisen tarkastelun laskentamenetelmän valinta riippuu tarkasteltavasta ongelmasta ja sen vaativuudesta. Suunnittelussa tulee käyttää laskentamenetelmiä, joiden kelpoisuus on osoitettu (RakMk E1 2011, kohta 1.3.2) validoinnin ja verifiointin (V&V) keinoin. Verifiointilla tarkoitetaan todentamisprosessia, jolla varmistetaan menetelmässä käytettävien laskentayhtälöiden tuottamien tulosten virheettömyys. Toisin sanoen todentamisessa yhtälöiden ei tarvitse kuvata oikein varsinaista ilmiötä, vaan itse laskennan täytyy tuottaa oikea tulos. Validointi puolestaan on kelpoisuusmenettely, jossa tutkitaan, soveltuvatko yhtälöt tarkasteltavan fysikaalisen ilmiön matemaattiseen mallinnukseen. Tyypillisesti validointi käsittää mallin tuottamien tulosten vertailua todellisiin polttokokeisiin. Eroavaisuudet, joita ei voida selittää mallin laskennallisilla virheillä tai polttokoe tulosten mittauserävarmuudella, pidetään fysikaalisen mallin yksinkertaistuksena tai oletuksena. (McGrattan et.al. 2008, s. 3-239)

Laskentamenetelmiä, joiden kelpoisuudesta ei ole pitävää näyttöä, ei tule missään olosuhteissa käyttää toiminnallisissa tarkasteluissa. (Hietaniemi 2007b) Vaikka valitun laskentamenetelmän kelpoisuus olisikin yleisesti hyväksytty, käyttäjän on aina suhtauduttava kriittisesti malliin ja sen tuottamiin tuloksiin, koska mikään menetelmä ei ole virheetön ja ne sisältävät aina tiettyjä rajoituksia. Tästä syystä luotettavan lopputuloksen takaamiseksi ja virheiden minimoimiseksi suunnittelijalta vaaditaan menetelmän käyttötaidon lisäksi tulosten herkkyystarkasteluja. (McGrattan et.al. 2008, s. 3-239)

Eurooppalaisten (EN) ja kansainvälisten (ISO) standardien mukaisten koe- ja laskentamenetelmien voidaan olettaa täyttävän kelpoisuusvaatimukset, mikäli sovellus on kyseessä olevan menetelmän pätevyysalueella. (RakMk E1 2011, s. 8) Rakenteiden osalta Eurokoodi 1 (EN 1991-1-2) sallii käytettävän fysiikkaan ja kemiaan perustuvia deterministisiä palomallin laskentamenetelmiä, joita ovat yksinkertaiset tai kehittyneet laskentamallit, kuten vyöhyke- ja kenttämallit. Lisäksi tässä kappaleessa käsitellään

myös yksinkertaisia siirtymismalleja ja poistumissimulointeja, jotka ovat nykypäivänä olennainen osa toiminnallisia tarkasteluja.

3.2.1 Yksinkertaiset laskentamallit

Yksinkertaiset laskentamenetelmät soveltuvat käsin ja tietokonelaskentaan, kuten taulukkolaskentaohjelmiin. Tyypillisesti ne ovat muutaman rivillä ilmaistavia lausekkeita, jotka ovat käyttökelpoisia esimerkiksi paloteknisten suunnitelmien viranomaishyväksynnän tueksi tai kehittyneempien laskentamenetelmien tulosten arvioimiseen, jotta varmistetaan tulosten oikeasta suuruusluokasta. (Hietaniemi 2007b, s. 24) Yksinkertaisia laskentakaavoja ovat esimerkiksi (SFPE 2008, Section 2 & 3) Heskestadin ja McCaffreyn palopatsasmalli, McCaffreyn, Quintieren ja Harkeloadin malli kehittyvän huonepalon lämpötiloille, Law'n malli täyden palamisen vaiheessa olevan huonepalon lämpötilalle ja Babrauskaksen malli lieskahdukseen tarvittavan palotehon arviointiin. Tässä yhteydessä esitetään EN 1991-1-2 (2002, liite C) mukainen menetelmä paikallisen palon liekkikorkeuden ja lämpötilan laskentaan sekä McCaffreyn palopatsasmallin käyttö lämpötilojen laskennassa.

Paikallisen palon liekkien pituus L_f [m] saadaan kaavasta:

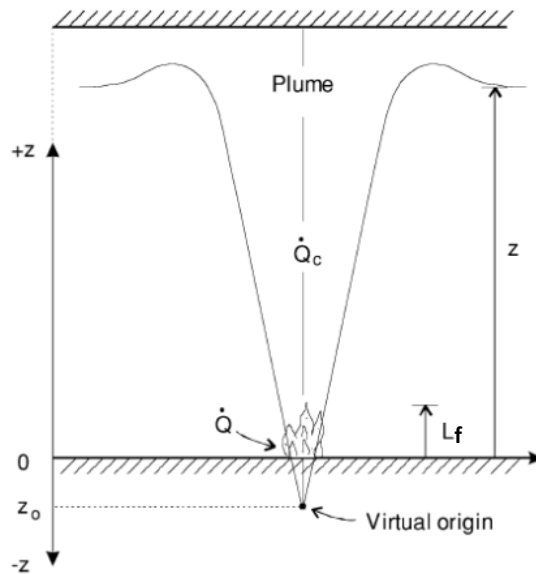
$$L_f = -1,02D + 0,0148\dot{Q}^{2/5} \quad (11)$$

missä D on palon läpimitta [m] ja \dot{Q} on lämmönluovutusnopeus palossa [W]. Kun palo tapahtuu avoimessa tilassa tai liekki ei törmää tilan kattoon kuvan 3.5 mukaisesti, pystytään kaavasta (12) laskemaan lämpötila T [°C] pitkin palopatsaan pystysuuntaista symmetria-akselia z , missä \dot{Q}_c on palavasta aineesta nopeudella \dot{Q} vapautuvan lämmön kuljettumalla siirtyvä osa [W], jonka oletetaan Eurokoodi 1:n mukaan olevan 80 % kokonaispalotehosta. Akselin luonnollisen origon paikka z_0 [m] saadaan kaavasta (13) ja T_0 on ympäristön lämpötila. Eurokoodissa esitettyä menetelmää kutsutaan myös Heskestadin palopatsasmalliksi.

$$T = T_0 + 0,25\dot{Q}_c^{2/3}(z - z_0)^{-5/3} \leq 900^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$z_0 = -1,02D + 0,00524\dot{Q}^{2/5} \quad (13)$$

Edellä esitetyt kaavat pätevät, jos palon läpimitta on enimmillään 10 m ja palon lämmönluovutusnopeus rajoittuu arvoon $\dot{Q} \leq 50$ MW. Tilanteissa, joissa liekki osuu kattoon, EN 1991-1-2 (2002) tarjoaa keinon laskea katon korkeudella sijaitsevaan palolle altistettuun rakenteeseen kohdistuva nettolämpövuoto.



Kuva 3.5. Liekkikorkeuden ja lämpötilan laskennassa käytettäviä muuttujia. (Karlsson 1999, s. 64)

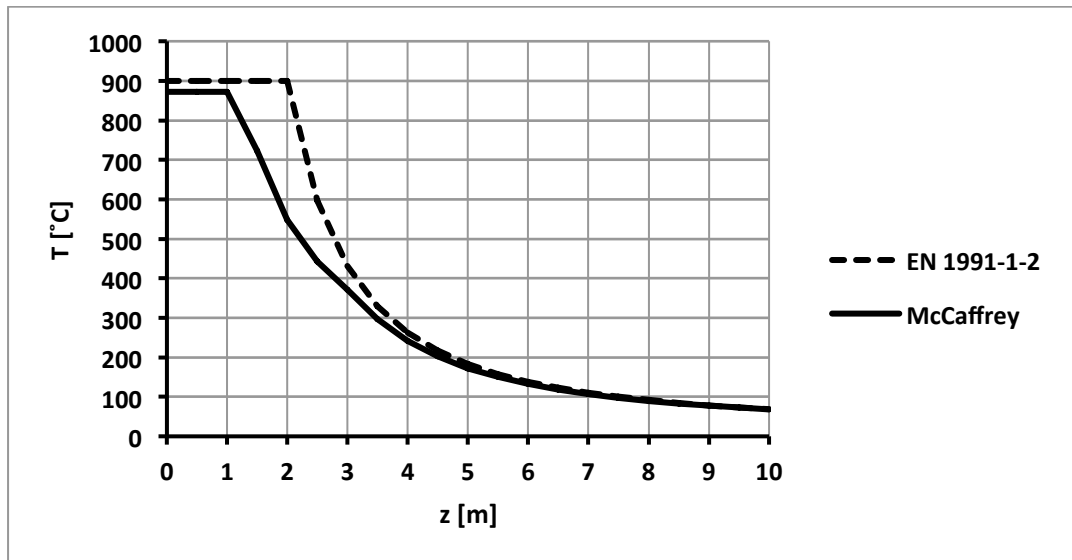
McCaffreyn (1979) palopatsasmallissa palopatsas jaetaan korkeussuunnassa pysyvään liekkiin, hulmahtelevaan liekkiin ja savupatsaaseen. Lämpötila T [°C] näillä alueilla voidaan laskea kaavasta (14) (Karlsson 1999, s. 67), joissa muuttujat η ja κ riippuvat korkeuden ja palotehon välisestä suhteesta taulukon 3.1 mukaisesti. Kaavan (14) tapauksessa kokonaispaloteho \dot{Q} ilmoitetaan laskentakaavaan kilovatteina [kW].

$$T = T_0 + \left(\frac{\kappa}{0,9\sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} (T_0 + 273) \quad (14)$$

Taulukko 3.1. McCaffreyn palopatsasmallin vakiot. (Karlsson 1999, s. 67)

Alue	$z/\dot{Q}^{2/5}$ [m/kW ^{2/5}]	η	κ
Pysyvä liekki	< 0,08	0,5	6,8
Hulmuava liekki	0,08 - 0,2	0	1,9
Savupatsas	> 0,2	-0,33	1,1

Kuvassa 3.6 on verrattu Eurokoodin ja McCaffreyn palopatsasmallin kaavojen tuottamia tuloksia keskenään, kun palotehona on käytetty 1 MW ja palon halkaisijana 1 m.



Kuva 3.6. *Palopatsasmallien vertailu, kun paloteho 1 MW, palon halkaisija 1 m ja alkulämpötila +20 °C.*

Kuvaajien perusteella todetaan, että palopatsasmallien tuottamat tulokset poikkeavat toisistaan lähestyttäessä palopesäkettä, koska McCaffreyn mallissa palopatsas jaetaan kolmeen osaan, jolloin on mahdollista tutkia tarkemmin lämpötiloja eri korkeuksilla. Toisaalta rakenteiden palomitoituksen kannalta Eurokoodin laskentakaava tuottaa varmallalla puolella olevan tuloksen lämpötiloista. Käytetyillä menetelmillä pystytään selvittämään tulosten suuruusluokka, mutta laskelmien monimutkaistuessa on käytettävä kehittyneempiä laskentamalleja.

3.2.2 Vyöhykemallit

Vyöhykemallit ovat fysiikan säilymislakeihin perustuvia malleja, jossa mallinnettava tila jaetaan korkeussuunnassa 1 - 2 vyöhykkeeseen haluttujen laskentatietojen selvittämiseksi ajan funktiona. Yksivyöhykemalli soveltuu ainoastaan lieskahduksen jälkeisiin olosuhteisiin, jolloin oletetaan palotilan kaasussa vallitsevan koko tilan korkeudella homogeeninen lämpötila, tiheys, sisäinen energia ja paine. Lämpötilan laskennassa otetaan huomioon massan- ja energiansäilymisytälöt kaavojen (15) ja (17) mukaisesti. Massan vaihtumiseen vaikuttavat aukkojen läpi ulos menevän \dot{m}_{out} ja sisään tulevan \dot{m}_{in} kaasun massavirta, pyrolyysissa vapautuvan kaasun massan syntymisnopeus \dot{m}_{fi} ja palotilan sisältämän kaasun massan muuttumisnopeus dm/dt [kg/s]. Kaasun massan pyrolyysinopeus ja muuttumisnopeus ovat kuitenkin vain murto-osan (muutamia prosentteja) aukkojen läpi kulkevasta massavirrasta, jolloin ne voidaan jättää ottamatta huomioon ja yhtälö (15) sievenee muotoon (16). Massavirtaukset voidaan laskea tavanomaisessa lämpötilassa olevan ilman tiheyden ja korkeassa lämpötilassa olevan ilman tiheyden erotuksesta aiheutuvan staattisen paine-eron perusteella. (EN 1991-1-2 2002, s. 74; Karlsson ym. 2000, s. 101)

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{m}_{fi} \quad (15)$$

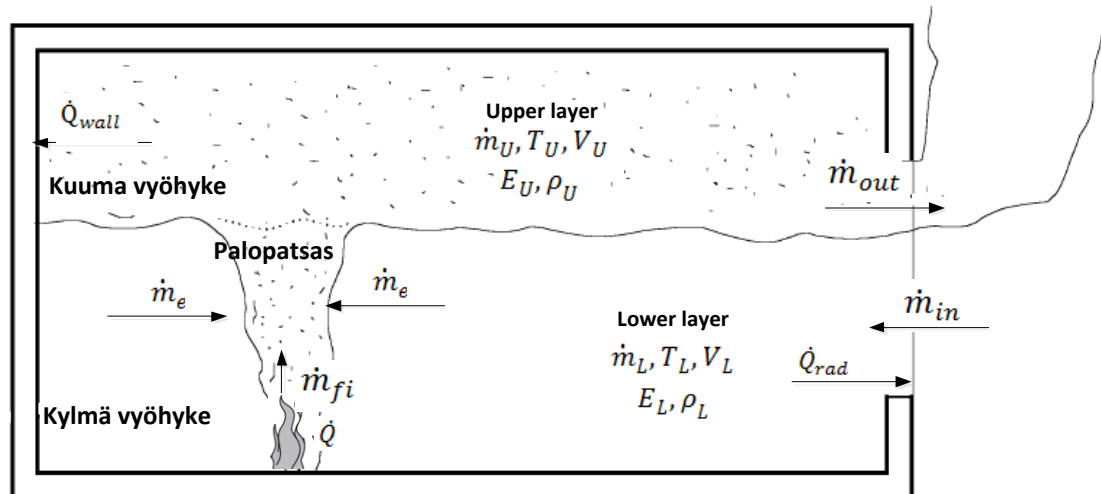
$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} \quad (16)$$

Kaasujen energiatasapaino voidaan kirjoittaa muodossa

$$\frac{dE_g}{dt} = \dot{Q} + \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{wall} - \dot{Q}_{rad} \quad (17)$$

missä E_g on kaasun sisäinen energia [J], \dot{Q} lämmönluovutusnopeus [W] palossa, \dot{Q}_{in} ja \dot{Q}_{out} aukkojen läpi sisään tulevien ja ulos menevien kaasujen lämmön siirtymisnopeus, \dot{Q}_{rad} aukkojen läpi säteilemällä poistuvan lämmön siirtymisnopeus sekä \dot{Q}_{wall} säteilemällä ja kuljettumalla palotilan pintoihin siirtyvä energiahäviö. (EN 1991-1-2 2002, s. 74)

Kaksivyöhykemalli soveltuu ennen lieskahdusta tapahtuvaan laskentaan, jossa laskenta-alue koostuu ylemmästä savua sisältävästä kuumasta kerroksesta ja alemmasta viileän ilman kerroksesta kuvan 3.7 mukaisesti. Lähtötiedoiksi tarvitaan tilan geometria, tilaa rajoittavien pintojen materiaaliominaisuudet sekä tiedot mitoituspalosta palotehona tai massanmuutosnopeutena sijainteineen. (Kokkala 2000, s. 48) Palo toimii energianlähteenä kehittäen kuumaa palopatsasta, johon ympäröivä ilma sekoittuu. Palopatsas kohoaa ylöspäin tiheyseron vaikutuksesta ja muodostaa kuumaa kerroksen katon raja. Molempien vyöhykkeiden olosuhteiden kehittymistä kuvataan erikseen massan, liikemäärän, energian ja palamistuotteiden säilymislakien avulla. Massan ja energian liike kerrosten välillä otetaan huomioon palopatsasmalleilla. (Carlsson 1999, s. 13)



Kuva 3.7. Kaksivyöhykemallin periaate (muokattu Karlsson 1999)

Tuloksena saadaan esimerkiksi massa- ja energiavirtojen liikkeet, savun leviäminen, keskimääräinen kuumaa kerroksen lämpötila (kylmän kerroksen lämpötila oletetaan huoneen alkulämpötilaksi) sekä kuumaa ja kylmän kerroksen rajapinnan sijainti ajan funktiona. Mallia voidaan hyödyntää myös sprinklereiden ja paloilmalaitteiden aktivointiajan arviointiin. (Kokkala 2000, s. 48 - 49) Palokuormaltaan tasaisesti jakautuneessa

tilassa kaksivyöhykepalomallin mukainen tilanne voi kehittyä yksivyöhykemalliksi, jos kaasun lämpötila ylemmässä kerroksessa kohoaa yli 500 °C tai kuuman kerroksen korkeus kasvaa käsittämään 80 % koko tilan korkeudesta. (EN 1991-1-2 2002, s. 76)

Karlsson (1999, s. 259) on listannut joukon oletuksia, jotka koskevat kaksivyöhykemallia. Kahden erillisen tasalämpöisen vyöhykkeen käyttö antaa kohtuullisia arvioita olosuhteista, vaikka todellisuudessa huoneen koosta ja palon lämmönluovutuksesta riippuen näillä kahdella kerroksella ei ole selkeää rajapintaa. (Olenick 2003, s. 90 - 91) Lisäksi ylemmän kerroksen lämpötila on vain keskiarvo koko kerroksen alueelta, joten lämpötilat voivat olla katon rajapinnassa myös suuremmat. Malli toimii parhaiten silloin, kun palotehon muutos on hidasta ja huoneessa olevat aukot ovat tarpeeksi suuret, jolloin tilaan ei muodostu muita häiritseviä virtauksia. (Kokkala 2000, s. 48 - 49)

Vyöhykemalleja on mahdollista laskea aivan yksinkertaisimmissa tapauksissa käsin, mutta laskelmien monimutkaistuessa tietokonelaskelmat ovat ehdottomat. Vyöhykemalliohjelmia on listattu maailmalta lukematon määrä (Olenick 2003, s. 92 - 93), joista tässä yhteydessä mainittakoon yhdysvaltalainen CFAST (Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport), uusi-seelantilainen BRANZFIRE ja belgialainen OZone V2, joiden ominaisuuksista on tiivistetysti kerrottu enemmän kirjallisuudessa Walton (2008a, s. 3-224 – 3-226).

3.2.3 Kenttämallit

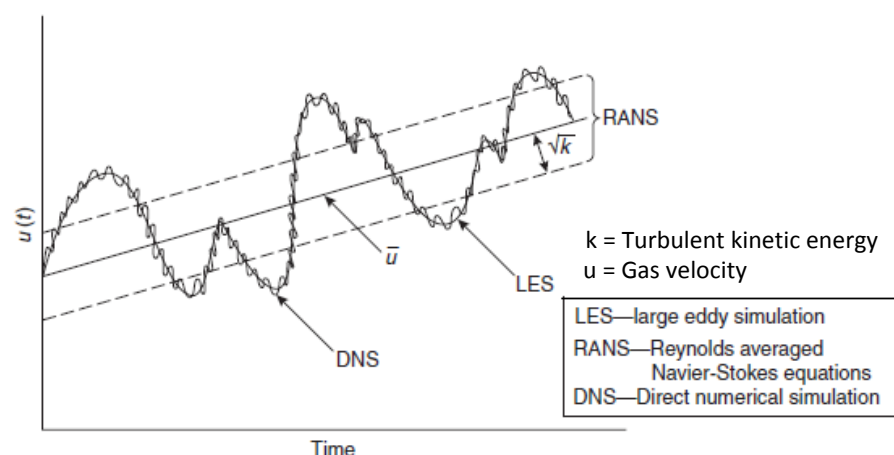
Kenttämallit ovat kehittyneimpiä laskennallisia palomalleja kuvaamaan todellista palonkehitystä ja vuorovaikutusta ympäristön kanssa. Yksinkertaisempaan vyöhykemalliin verrattuna kenttämallin laskenta-alue jaetaan palosimulointia varten tuhansiin tai jopa miljooniin tilavuusyksiköihin eli hilakoppeihin. Jokaiselle hilakopille määritetään toiminnallinen funktio, kuten rakenneosa tai ilma, jolloin laskentamaailmaan rakentuu mahdollisimman paljon todellisuutta kuvaava geometria. Laskentaa rajoittavat reunaolosuhteet on myös määritettävä simuloinnin mahdollistamiseksi. (Carlsson 1998, s. 14)

Varsinainen kenttämallin laskenta voidaan suorittaa esimerkiksi CFD (Computational Fluid Dynamics) -tekniikkaa käyttäen, joka nykypäivänä on insinööritieteiden alalla laajalti käytössä. Tämä kolmiulotteista numeerista virtauslaskentaa hyödyntävä tekniikka on kehitetty alun perin muihin virtausmekaniikan ongelmiin yli 50 vuotta sitten, mutta ohjelmistojen ja laskentakapasiteetin kehittyessä sen käyttö on laajentunut myös palotekniikan saralle. (Cox ym. 2002, s. 3-194) Virtausdynaamisissa laskelmissa ratkaistaan massan, energian ja liikemäärän säilymisen perusyhtälöistä muodostettuja ajasta riippuvia differentiaaliyhtälöitä. (Carlsson 1998, s. 14) Säilymislaeissa oletetaan, että kaasun massa säilyy ja liikemäärän muuttumisnopeus on yhtä suuri kuin kaasuhiukkaseen vaikuttavien voimien summa Newtonin toisen lain mukaisesti. Lisäksi termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaisesti suljetun järjestelmän sisäisen energian muuttumisnopeus on yhtä suuri kuin lämpöenergian kasvunopeuden ja järjestelmään tehdyn työn summa. (EN 1991-1-2, s. 76) Säilymislakien perusyhtälöt sisältävät lisämuuttujina viskositeettitermit, joilla otetaan huomioon fluidin (neste tai kaasu) kykyä vastustaa virtausta. Näiden termien käyttö yhtälöissä tuottaa niin kutsutut Navier-Stokes

-yhtälöt, joiden ratkaisu on CFD -koodin ydin. (Karlsson 1999, s. 280) Yhtälöt ratkaistaan jokaisessa hilakopin mukaisessa palotilan pisteessä erikseen, jolloin mahdollistetaan ajan ja paikan suhteen vaihteleva lämpöaltistuksen ennustaminen. (McGrattan ym. 2008) Tarvittavat approksimaatiot vyöhykemalleihin verrattuna ovat siis hyvin vähäiset.

Todellisuudessa palotapahtuma on kuitenkin hyvin monimutkainen kokonaisuus, jonka mallinnukseen ei riitä pelkästään normaali virtauslaskenta ja lämmönsiirto. Todennukaisen palosimuloinnin mahdollistamiseksi nykyiset CFD -pohjaiset ohjelmistot sisältävät myös lukuisia alimalleja, jotka kuvaavat esimerkiksi palamisprosessia, savun muodostusta, lämpösäteilyä ja virtauksen turbulenssia. (Karlsson 1999, s. 281) Siksi nykyiset ohjelmistot soveltuvat palo-olosuhteiden muuttumisen laskennan lisäksi myös palon kehittymisen laskentaan. (Hietaniemi 2007b, s. 24)

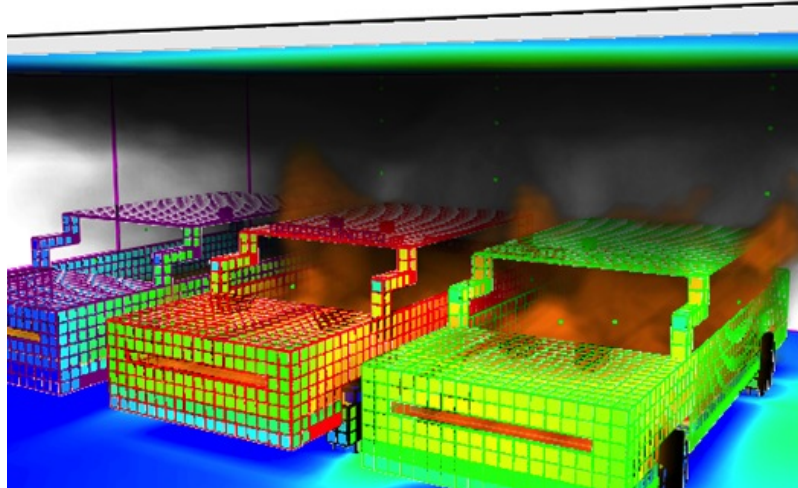
Yksi merkittävimmistä laskennallisista oletuksista kenttämalleissa tehdään kuvattaessa virtauksessa esiintyvää turbulenssia, koska turbulenssin synnyttämien pyörteiden takia täydellinen mallinnus vaatisi paljon laskentatehoa. Osittaisdifferentiaaliyhtälöjen täydellinen numeerinen simulointi (DNS) on mahdollista, jos hilaverkko paloreaktioiden alueella on tarpeeksi tiheä. Käytännössä tämä tarkoittaa hilakoppikooksi alle 1 mm, joten yksinkertaistukset laskennan suorituksessa ovat tarpeen. Käytännöllisempi lähestymistapa ratkaisuun on turbulentin liikkeen suodattaminen Navier-Stokes -yhtälöistä. Menetelmää kutsutaan Reynoldsin keskiarvotamiseksi. Tunnetuin RANS -yhtälöihin (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) perustuva malli on $k-\epsilon$ -turbulenssimalli, joka on kaksiyhtälömalli kineettiselle energialle k ja sen häviämismopeudelle eli dissipaatiolle ϵ . Vaihtoehtoinen lähestymistapa on hyödyntää suurpyörre -simulaatiotekniikkaa (LES), missä suuremmat turbulentitiset pyörteet simuloidaan tarkasti, mutta pienemmän skaalan pyörteet mallinnetaan joko samalla tavoin kuin RANS -yhtälöissä tai ne jätetään kokonaan mallintamatta. Turbulenttisen virtauksen laskentatekniikoita on havainnollistettu kuvassa 3.8. (Cox ym. 2002, s. 3-196)



Kuva 3.8. Turbulenttisen virtauksen mallintamiskeinot. (Cox et.al. 2002, s. 3-196)

Tyypillinen hilakoko paloalueella on yleensä suuruusluokkaa 10 cm mallinnettavan tilan koosta ja tarvittavan tuloksen tarkkuudesta riippuen. Kuvassa 3.9 on havainnollistettu kenttämallin laskenta-alueen muodostuminen tuhansista hilakopeista, joissa jokai-

sessä suoritetaan virtausyhtälöiden laskenta. (Partanen & Heinisuo 2013) Laskentatulokset ovat paljon yksityiskohtaisempia verrattuna vyöhykemalleihin, mutta laskentakoneilta tarvittavaa laskentakapasiteettia tarvitaan huomattavasti enemmän ja ohjelmaan syötettävien lähtötietojen on oltava tarkempia. (Olenick 2003, s. 91) Kenttämalleissa laskentatulokset esitetään usein erillisen ohjelmiston avulla, jolla luodaan käyttäjälle tulosten analysointia helpottava graafinen esitystapa. (Carlsson 1998, s. 15)



Kuva 3.9. Kenttämallin (FDS) hyödyntäminen autopalojen mallinnuksessa (Partanen & Heinisuo 2013).

Kenttämallien etuna on, että mallin avulla pystytään tutkimaan samanaikaisesti esimerkiksi itse palotapahtumaa, lämmönsiirtoa ympäristöön, savun muodostusta, myrkyllisten kaasujen tuottoa ja niiden vaikutusta tiloissa oleviin ihmisiin. Muuttujien lisääntyessä ja laskelmien monimutkaistuessa kenttämallin käyttäjiltä vaaditaan kriittisyyttä ja asiantuntemusta saatuja tuloksia kohtaan, koska virheelliset laskentatulokset voivat näyttää hyvinkin uskottavilta. (Kokkala 2000, s. 23) Oikein käytettynä ja perusteltuna kenttämallit antavat arvokkaita näkökulmia ja käsitystä vahvistavia vastauksia ongelmiin, jotka ovat monimutkaisia, ja joista ei ole palotilanteessa aikaisempaa vastaavaa kokemusta. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi atriumit, kuilut ja tunnelit maanalaisissa tiloissa, lentoasemat ja teolliset rakennukset. (Bilger 1995)

Tunnetuin CFD -mallinnukseen perustuva laskentaohjelma on NIST:in (National Institute of Standards and Technology) ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) yhteistyönä kehittämä Fire Dynamics Simulator eli FDS (McGrattan ym. 2010), jota hyödynnetään myös tässä tutkimuksessa. Myös muita kenttämalleja on kehitetty kymmenittäin (Olenick 2003, s. 94), joista tunnetuimpia FDS:n lisäksi lienevät Smartfire, CFX Flow3D ja Sofie. (McGrattan 2008, s. 3-330)

3.2.4 Poistumismallit

Poistumisen mallintaminen voi olla tarpeen tilanteissa, joissa taulukkomitoituksen sallimat rajat ylitetään tai tilaan halutaan entistä paremmin optimoituja poistumisjärjestelyjä. Niiden tarkoituksena on varmistaa, että rakennuskohteessa olevat henkilöt voivat

tulipalon sattuessa poistua turvallisesti ennen kuin olosuhteet muodostuvat henkilöturvallisuuden kannalta kohtalokkaiksi. (Weckman 2005, s. 8) Yleisesti ottaen vaatimus turvalliselle poistumiselle saavutetaan, jos käytettävissä oleva poistumisaika (ASET) on suurempi kuin poistumiseen tarvittava aika (RSET). (Nelson et.al. 2002, s. 3-367)

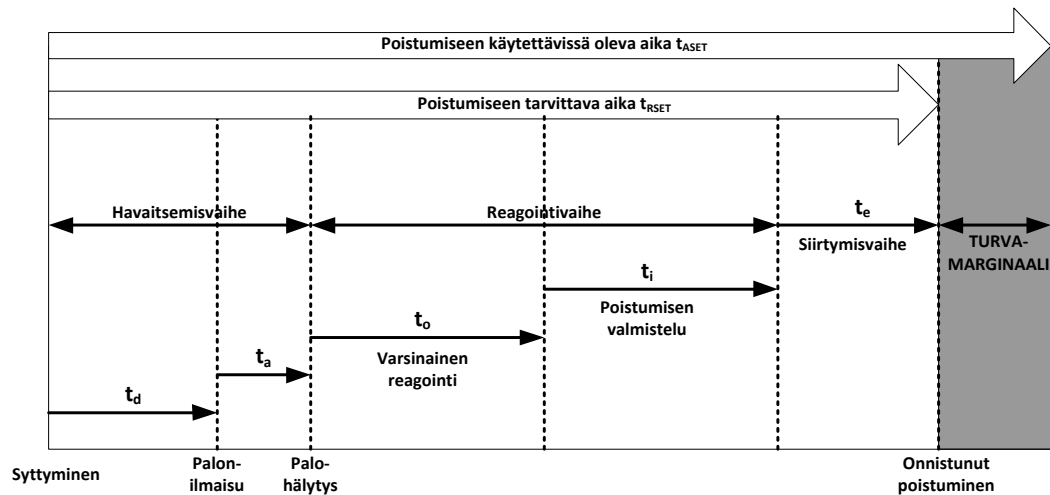
$$t_{RSET} < t_{ASET} \quad (18)$$

Poistumiseen käytettävissä olevaa aikaa voidaan arvioida palosimuloinneilla, jolloin valituissa palotapauksissa lasketaan rakennuskohteen eri tiloissa tulipalon aikana vallitseva lämpötila, lämpösäteily, näkyvyys ja erilaisten myrkyllisten kaasujen pitoisuus. Poistumiseen kuluva aika puolestaan lasketaan poistumismallien avulla. Kyseisen ajanjakson aikana poistujien altistus edellä mainituille ympäröiville olosuhteille ei saa ylittää missään vaiheessa hyväksymiskriteerien arvoja, jotka voivat vastata henkilön loukkaantumista, kuolemaa tai muuta turvallisuutta vaarantavaa rajaa. (Weckman 2005, s. 8) Kokonaispoistumisaika jaetaan usein eri kirjallisuuslähteissä vähintään kolmeen välittömästi toisiaan seuraavaan vaiheeseen. Nelson ym. (2002, s. 3-367) on jakanut vaadittavan poistumisajan viiteen osaan:

$$t_{RSET} = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e \quad (19)$$

missä t_d on ajanjakso palon syttymisestä palonilmaisuuksiin ja t_a on ajanjakso palonilmaisusta palohälytykseen. Ajanjaksoa palon syttymisestä hälytykseen kutsutaan yleensä havaitsemisvaiheeksi, jonka pituutta arvioidaan pääasiassa paloilmalaitteiden herkkyydestä ja hälytysjärjestelmistä. Hälytys voi tulla myös henkilöiden omien havaintojen perusteella. Varsinaisen reagointivaihe t_o on aika, jolloin tehdään havaintoja ennen päätöstä tehdä toimenpiteitä, ja t_i on poistumisen valmisteluun kuluva ajanjakso toimenpiteistä varsinaisen evakuoinnin aloittamiseen. Reagointivaiheen aikana ($t_o + t_i$) ihmiset pohtivat eri toimintavaihtoehtoja, joita ovat esimerkiksi lisätietojen hankkiminen, muiden varoittaminen tai sammutustoiminnan aloittaminen. Näiden vaiheiden arviointi on erityisen vaikeaa, koska ihmisten käyttäytyminen ja toimenpiteet palon aikana vaihtelevat paljon. Tästä syystä reagointivaiheen aikaa arvioidaan yleensä kokemukseräisten taulukkoarvojen pohjalta. Viimeisenä on itse siirtymisvaihe t_e , jonka aikana tulee tapahtua kaikkien henkilöiden osalta turvallinen poistuminen. (RIL 221 - 2003, s. 57)

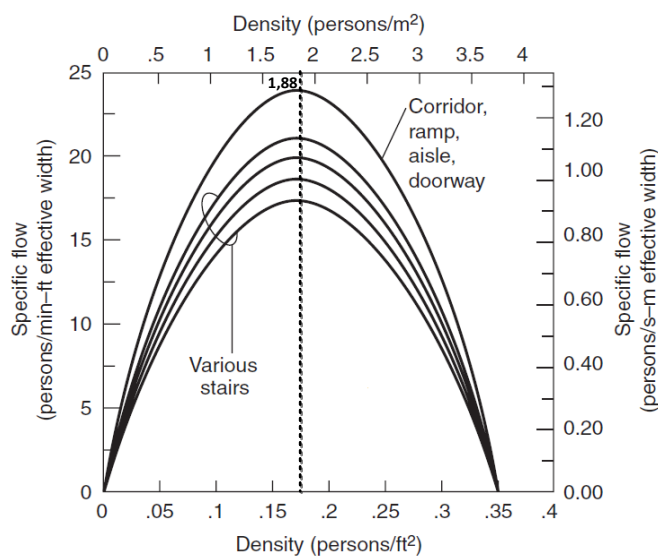
Poistumismallit soveltuvat pääasiassa pelkästään siirtymisvaiheen mallinnukseen ja siihen kuluvaan ajan arviointiin. Siirtymisvaiheen aikaa on mahdollista laskea yksinkertaisilla laskentamenetelmillä sekä tietokonepohjaisilla poistumissimuloinneilla. Usein määritetään laskennallisesti pelkästään fyysisen siirtymisvaiheen pituus (t_e), jolloin poistumista edeltävien vaiheiden pituudet arvioidaan taulukkotiedoista. Simulointimalleissa edeltävät vaiheet voidaan ottaa huomioon viivyttämällä poistumisen alkamisajan kohtaa palon syttymishetkestä. (Weckman 2005, s. 11)



Kuva 3.10. Poistumisaikalaskelmien periaate. (Proulx 2008, s. 3-355)

Yksinkertaiset poistumiseen soveltuvat menetelmät ovat tyypiltään pääasiassa hydraulisia malleja, joissa henkilöiden siirtyminen on analoginen nesteen putkivirtauksen tai kuulalaakerin kuulien liikkeen kanssa. Mallissa tutkitaan pääasiassa poistumisnopeuden ja poistuvien henkilöiden virtaustiheyden välisen suhteen vaikutusta poistumisaikaan. Hydraulisisissa malleissa oletetaan, että kaikki henkilöt aloittavat poistumisen samanaikaisesti, samalla nopeudella ja liike etenee jatkuvasti ilman päätöksentekoon vaikuttavia häiriötekijöitä. Mallin henkilöillä ei oleteta olevan mitään liikuntarajoitteita ja ne käsitellään homogeenisen joukon jäseninä, joilla ei ole yksilöllisiä ominaisuuksia. (Gwynne 2008, s. 3-377)

Ihmisjoukoilla tehdyissä kokeissa on havaittu selvä riippuvuus poistumisvauhdin ja henkilötiheyden välillä. Henkilötiheyden ylittäessä optimaalisen arvon $1,88 \text{ hlö/m}^2$ poistumisvauhti pienenee. Jos henkilötiheys on 4 hlö/m^2 , ruuhkautuminen on täydellistä ja poistumisvauhti on käytännössä nolla. Tätä ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 3.11.



Kuva 3.11. Ominaishenkilövirran riippuvuus henkilötiheydestä poistumisen aikana. (muokattu Gwynne 2008, s. 3-381)

Keskeinen näitä muuttujia yhdistävä tekijä hydraulisten mallien poistumisaikalaskelmissa on ominaishenkilövirta F_s [hlö/(s·m)]

$$F_s = SD \quad (20)$$

$$S = (1 - 0,266D)k \quad (21)$$

missä S on henkilön poistumisnopeus [m/s], D on henkilötiheys [hlö/m²] ja k on kerroin, jonka suuruus riippuu poistumisreitistä ominaisuuksista. Esimerkiksi tasaisilla käytävillä kerroin on suurempi (1,40) kuin portaikossa (1,00 – 1,25). (Gwynne 2008, s. 3-379)

Siirtymisvaiheeseen kuluva aika lasketaan kaavasta (22), joka muodostuu ensimmäisen henkilön käyttämästä ajasta saavuttaessa uloskäytävän alkupäähän sekä tyhjentämiseen kuluvasta ajasta (Weckman 2005, s. 28)

$$t_e = \frac{L}{S} + \frac{N}{F_s W_e} \quad (22)$$

missä L on henkilön etäisyys uloskäytävän alkupäästä [m], N on henkilöidenlukumäärä ja W_e on uloskäytävän tehollinen leveys [m]. Edellä lueteltuja yhtälöitä on mahdollista käyttää yksinkertaisimmissa mahdollisissa poistumistapauksissa, joissa ei ole kulkureitin muutoskohtia. Käytännön tilanteissa henkilövirrassa tapahtuu kuitenkin muutoksia, kun kulkureitin leveys muuttuu (esimerkiksi ovi), reitti muuttuu (siirrytään kerroksesta portaikkoon) tai henkilövirrat yhtyvät tai jakautuvat. Muutoskohdissa pätee yleisesti (Gwynne 2008, s. 3-382)

$$\sum_{i=1}^m (F_{s(in)} W_{e(in)})_i = \sum_{j=1}^n (F_{s(out)} W_{e(out)})_j \quad (23)$$

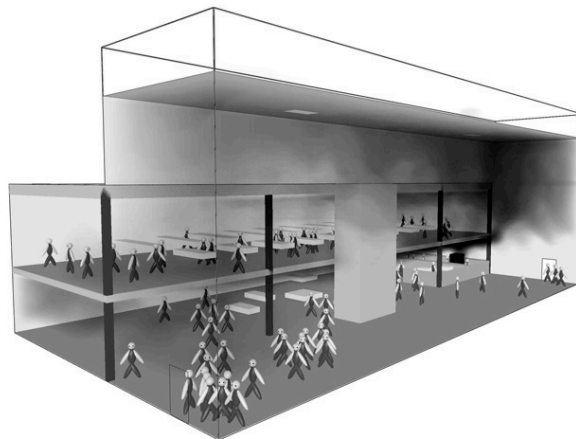
missä yhtälön vasemmalla puolella olevat termit kuvaavat muutoskohtaan saapuvaksi laskettua henkilövirtaa [hlö/s] ja oikeanpuoleiset termit muutoskohdasta lähteväksi laskettua henkilövirtaa. Esimerkiksi käytävän päässä olevan oven tapauksessa ovi on teholliselta leveydeltään kapeampi kuin käytävä, jolloin oven läpi tulevan ominaishenkilövirran tulisi olla suurempi kuin käytävän ominaishenkilövirran, jotta henkilövirta olisi yhtä suuri ja pysyisi tasaisena oven molemmin puolin. Suurten ihmismäärien tapauksessa poistumisnopeudesta riippuva ominaishenkilötiheys ei voi kuitenkaan kasvaa rajattomasti, jolloin oven eteen muodostuu ruuhkaa. (Weckman 2005, s. 28)

Hydraulisten mallien laskentatulokset tuottavat usein ylioptimistisia tuloksia ja näiden jäljittelemä tilanne poikkeaa hyvin usein merkittävästi todellisuudesta. Käsien laskettavat menetelmät soveltuvat lähinnä vain yksinkertaisiin tapauksiin, joissa epävarmuutta aiheuttavia muuttujia on vähän ja palolla ei ole suurta merkitystä poistumiseen. Näissäkin tapauksissa tulosten tulkinnassa tulee noudattaa erityistä varovaisuutta. (Weckman

2005, s. 23 - 24) Yksinkertaiset laskentamallit eivät esimerkiksi osaa ottaa huomioon palosta aiheutuvia vaikutuksia ihmiselle, kuten lämpötilaa, lämpösäteilyä, näkyvyyttä ja myrkyllisten kaasujen pitoisuutta.

Astetta realistisempi kuvaus todellisuudesta ovat poistumissimulaatiomallit, joiden avulla pyritään jäljittelemään ihmisten käyttäytymistä ja poistumista siirtymävaiheen aikana mahdollisimman tarkoin. Kuligowski & Peacock (2005) ovat listanneet ympäri maailmaa kehitettyjä poistumissimulaatio-ohjelmia. Simulaatiomallin erityisominaisuuksiin voivat kuulua esimerkiksi palon vaikutuksille altistuminen, vastavirtaan liikkuminen poistumistilanteessa, valintamahdollisuus poistumisreitissä, poistujien mielen ja liikkumiskyvyn huomioonottaminen sekä hissien käytön mahdollisuus.

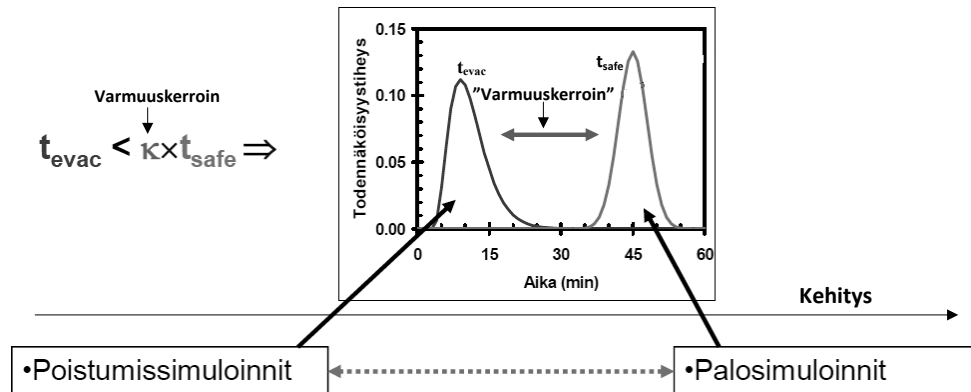
Listan ulkopuolisista simulaatio-ohjelmista mainitaan tässä yhteydessä VTT:n ja NIST:n yhteistyössä kehittämä evakuointi-simulointimoduuli FDS + Evac, joka sisältyy Fire Dynamics Simulatorin asennuspakettiin. FDS + Evac ohjelmalla on mahdollista simuloida samanaikaisesti palon kehittymistä ja poistumista. Se mallintaa jokaisen poistujan erillisenä ”agenttina”, jolla on henkilökohtaiset ominaisuudet ja poistumisstrategiat. Agenttien liike simuloidaan rakennusten lattioita mukailevina kaksiulotteisina tasoina, joissa poistumisliike muodostuu ajasta riippuvan liikeyhtälön algoritmin ratkaisusta. Agenttien liikkeisiin vaikuttavat voimat koostuvat esimerkiksi kontaktivoiman ja gravitaation aiheuttamista fysikaalisista voimista sekä ympäristön ja muiden agenttien aiheuttamista psyykkisistä rasituksista. Poistumissimulaatiossa otetaan myös huomioon esimerkiksi savun ja haitallisten kaasujen (FED) vaikutus kävelynopeuteen, poistumisreitin valinnan logiikka ja ruuhkautuminen. (Korhonen & Hostikka 2009)



Kuva 3.12. *FDS + Evac evakuointi-simulointimoduuli. (Korhonen 2009)*

Poistumismalleja käytettäessä tulisi tehtyjä oletuksia ja käytettävää mallia tarkastella kriittisesti sekä varmistaa, että ympäristöön ja henkilöihin liittyvät oletukset vastaavat mallinnettavaa tapausta. Useista eri epävarmuustekijöistä johtuen kokonaispoistumisaajan ja käytettävissä olevan poistumisaajan välillä on oltava jonkinlaisen turvamarginaali. Varmuuden riittävydestä ei ole ehdottomia vaatimuksia, vaan se joudutaan aina arvioimaan tapauskohtaisesti ”riittäväksi”. (Weckman 2005, s.12, 25) Kiinteän varmuuskertoimen käyttö onkin hieman epäkäytännöllistä, koska ihmisten havaintokyky, reagointi-

tavat ja liikkumisnopeudet vaihtelevat, joten poistumisen eri vaiheisiin kuluva aika ja edelleen poistumisen kokonaisaika ovat henkilöstä riippuen yksilöllisiä. Täten ihmisjoukon mallinnuksessa poistumisen kestoajoja ei pitäisi käsitellä yksittäisenä numeroarvona, vaan kestoajakajakautumina. (RIL 221 - 2003, s. 57) Varmuuskertoimen käsitettä poistumissimuloinneissa on havainnollistettu kuvassa 3.13.



Kuva 3.13. Poistumissimuloinneissa käytettävä varmuuskerroin. (Korhonen 2012)

Poistumisvaiheen mallinnuksessa poistumisreittien valintaa, poistuvien henkilöiden liikkuvuutta ja käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä voidaan varioida todennäköisyysjakaumien avulla, jolloin myös poistumiseen tarvittava aika vaihtelee. Lisäksi palo- ja poistumissimulointien vuorovaikutus voidaan ottaa huomioon tutkimalla palon todellisia vaikutuksia henkilön poistumiseen. Varmuuskerroin määräytyy tässä tapauksessa todennäköisyyspohjaisesti. Hyväksymiskriteerien täyttyminen varmistetaan tekemällä poistumissimulaatit riittävän montaa kertaa onnistuneesti läpi ilman, että turvallinen poistuminen vaarantuu.

4 CASE -TAPAUUS

4.1 Tarkastelun lähtökohdat

Tulipalot aiheuttavat usein yritykselle suuria seurausvahinkoja, joita ei voida pelkästään vakuuttamalla kompensoida. Menetetyn materiaalin lisäksi kustannuksia aiheuttavat esimerkiksi tuotannon katkeaminen, tilojen saneeraus ja pahimmassa tapauksessa myös ympäristökatastrofi. Seuraavissa kappaleissa esimerkkitapauksena käsitellään anonyymisti erään Suomessa toimivan yrityksen tuotantotilojen yhteydessä olevaa varastotilaa, joka nykyisillä järjestelyillä aiheuttaa palon sattuessa vakavasti otettavan turvallisuusriskin tehdasalueen toiminnalle ja samalla myös ympäristölle.

Sprinklaamattomana, nykyisten rakentamismääräysten mukaan rakenteellisesti puutteellisenä ja suuren palokuorman omaavana tuotevarastona tila on palon sattuessa uhka koko laitoksen toiminnalle. Tarve tilakohtaiselle riskitarkastelulle ilmeni yrityksen omasta halusta huolehtia ja ylläpitää yhtiön paloturvallisuutta sekä toiminnan jatkuvuutta tavoitteena lisätä tietoisuutta kohteen riskeistä. Tässä tapauksessa toimivaltaiset viranomaiset eivät olleet samalla tavoin projektin kannalta merkittävässä roolissa kuin yleensä, vaan paloturvallisuusvaatimukset tulivat yritykseltä itseltään. Tarkastelun tavoitteena oli selvittää varastosta aiheutuva paloturvallisuusriski nykyisellään sekä arvioida ja ehdottaa toiminnallisten tarkastelujen perusteella soveliaimpia toimenpiteitä omaisuusvahinkoriskin alentamiseksi. Vertaileva tarkastelu sisälsi toteutuskustannuksiltaan merkittävämpiä vaihtoehtoja, ”kevyemmät” ratkaisut käsiteltiin alustavan riskitarkastelun yhteydessä. Riskitarkasteluissa henkilöturvallisuudelle aiheutuvia riskejä ei tutkittu, vaan tarkastelussa rajoituttiin pelkästään omaisuus- ja keskeytysvahinkoihin.

4.2 Nykyinen varastotila

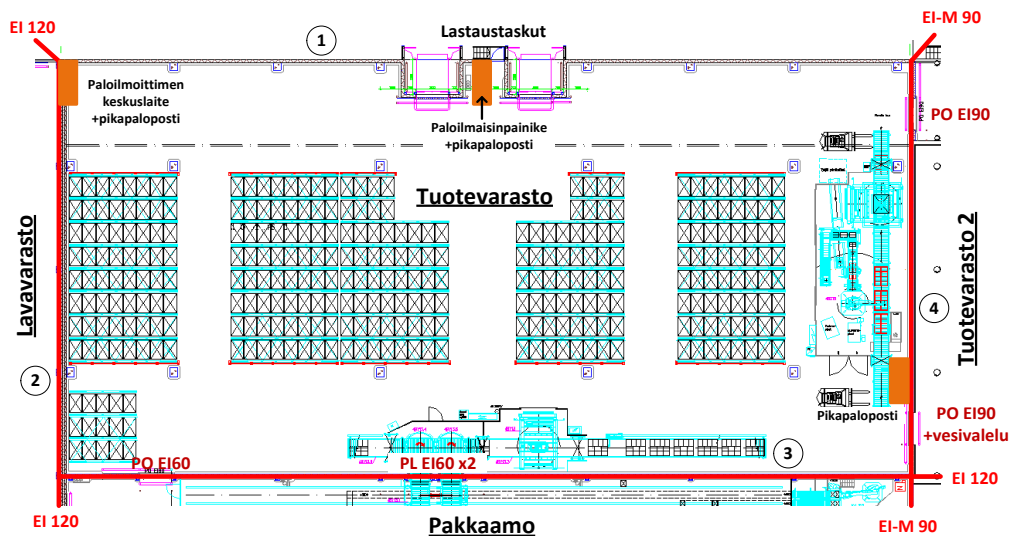
Yrityksen nykyinen varastotila toimii tuotevarastona pakkaushallista saapuville tuotelaivoille, jotka odottavat jatkokuljetusta myyntiä varten. Varastotiloissa tuotelavojen kuljetus hyllytelineisiin tai rekka-autoihin tapahtuu trukeilla. Kokonaiskuva varastotilan paloteknisestä tilanteesta luotiin lähtöaineiston ja vierailukäynnin avulla.

4.2.1 Geometria ja rajaavat rakenteet

Tuotevarastotila on pinta-alaltaan noin 1400 m² (54 m x 26 m) suuruinen palo-osastoitu tila, joka rajoittuu itäisellä seinustalla toiseen tuotevarastoon (jatkossa varasto 2), läntisellä seinustalla lavavarastoon ja eteläisellä seinustalla pakkaushalliin kuvan 4.1 mukaisesti. Tuotevarastojen välinen seinä on palonkestoluokaltaan EI-M 90, jonka rakenne

koostuu teräsohutlevypintaisesta kevytsandwichelementistä (175 mm) sekä betoniseinäelementistä (100 mm). Palomuurirakenne on aikoinaan suunniteltu toimivaksi tuotantorakennuksessa pinta-alaosastoinnin palo-osastorajana, mitä se ei kuitenkaan tällä hetkellä täysin toteuta. Nykyisen Eurokoodin (EN 1992-1-2) mukaan betonisen seinärakenteen paksuus tulisi olla vähintään 120 mm, jotta se voidaan luokitella kuuluvaksi palonkestoluokkaan EI-M 90.

Lavavaraston ja pakkaushallin väliset seinät ovat palonkestoluokaltaan EI 120, joiden rakenne koostuu betoni- (340 mm) ja kevytsandwichelementistä (200 mm). Ulkoseinä on myös kevytsandwichelementtirakenteinen.



Kuva 4.1. Tuotevaraston layout

Varastotilan yläpohja on ontelolaattarakenteinen, jonka yläpuolella on lämmöneriste ja bitumikermikate. Rakennetta kannattelevat jännitetyt teräsbetonipalkit ja edelleen elementtipilarit tilan korkeuden ollessa noin kahdeksan metriä. Alapohjarakenteena toimii paikalla valettu teräsbetonilaatta.

4.2.2 Ovet ja aukot

Tuotevarastosta on kulkuyhteys viereiseen tuotevarastoon, pakkaushalliin sekä lastaustaskujen kautta ulos. Varastojen välisessä seinässä on kaksi palo-ovea (EI 90), joista pakkaamon puoleinen on suojattu vesivalelulla. Vierailukäynnillä havaittiin toisen palo-ovista olevan määräysten vastaisesti auki, koska sulkeutuminen ei ollut mahdollista tukkeutuneen materiaaliveirran vuoksi. Palon sattuessa osastoiva rakenne on hyödytön, jos siihen liittyvät aukot ovat toiminnallisesti puutteellisia.

Tuotelavojen kuljetus pakkaushallista tuotevarastoon tapahtuu liukuhihnoja pitkin. Liukuhihnayhteyden välisenä palo-osastointina käytetään vastapainoperiaatteella toimivia paloluukkuja, jotka avautuvat ainoastaan käytön aikana. Palon sattuessa käytön aikana on kuitenkin mahdollista, että sulkeutumisautomaattiikka pettää ja luukut jäävät

avoimeksi. Aukkojen osastointivaatimuksessa on hyödynnetty Rakentamismääräyskoelman (EI 2011, 7.3.1) mahdollistamaa oven tunti- ja puolituntin luokan puolittamista.

4.2.3 Aktiivinen palontorjunta

Varaston suojaustaso nykyisenä suunnitteluratkaisuna on 2, jolloin tiloissa on paikallisesti ja hätäkeskukseen automaattisen ilmoituksen antava paloilmoin (näytteenottoilmaisoin) sekä suojaustason 1 mukainen alkusammutuskalusto.

Alkusammutuskalustona ovat pikapalopostit ja käsisammuttimet. Henkilökunta saa vuosittain koulutuksen alkusammutuskaluston käytöstä ja valvomotiloissa on ympäri- vuorokautinen miehitys, mutta tästäkin huolimatta sammutustyön aloittaminen voi kestää useita minuutteja, koska tiloissa ei ole jatkuvaa läsnäoloa.

4.2.4 Savunpoisto

Varaston savunpoisto on toteutettu automaattiotasona II, jolloin käytetään palokunnan toimesta laukaistavia savunpoistoluukkuja. Katossa sijaitsevat savunpoistoluukut (6 kpl) ovat kooltaan 1,2 x 2,1 m². Korvausilma saadaan tilaan ovien ja aukkojen kautta.

4.2.5 Palokuorma

Varaston palokuorma koostuu trukeista, kuormalavoista, pakkausmateriaaleista, sähkökaapeista, kaapeleista sekä erityisesti varastoitavasta tavarasta. Palokuormalaskelmien perusteella varaston palokuorman tiheys on suuri ylittäen Rakentamismääräyskoelman EI (2011) mukaisen suurimman luokan raja-arvon 1200 MJ/m². Lisäksi palo on todennäköisesti laadultaan nopeasti kehittyvä, koska syväkuormaushyllyihin varastoituna runsas palokuorma saa helposti happea lavojen välisten ilmarakojen kautta.

4.3 Tarkasteltavat skenaariokokonaisuudet

Paloturvallisuusriskin suuruutta arvioitiin neljässä eri tapauksessa. Perustapauksina 1 ja 2 käytettiin vaihtoehtoja, joita ovat varaston pitäminen nykyisellä sijainnilla tai rakentaa kokonaan uusi. Ensimmäisessä tapauksessa eli perustapauksessa 1A varaston suojaustaso säilytetään nykyisellä tasolla, jolloin tiloihin ei tehdä kevyitä korjauksia lukuun ottamatta mitään suuria muutoksia. Toisessa skenaariokokonaisuudessa 1B varasto säilytetään edelleen tuotantotilojen yhteydessä, mutta tilan suojaustasoa korotetaan tasoon 3 varustamalla tiloihin automaattinen sprinklerilaitteisto.

Taulukko 4.1. Case -tapauksessa tarkasteltavat skenaariokokonaisuudet.

Skenaariokokonaisuus	Toimenpide
1A	Nykyinen varastorakennus, ei suuria toimenpiteitä
1B	Nykyinen varastorakennus, korotettu suojaustaso (sprinkleri)
2A	Uusi varastorakennus, nykyinen suojaustaso
2B	Uusi varastorakennus, korotettu suojaustaso (sprinkleri)

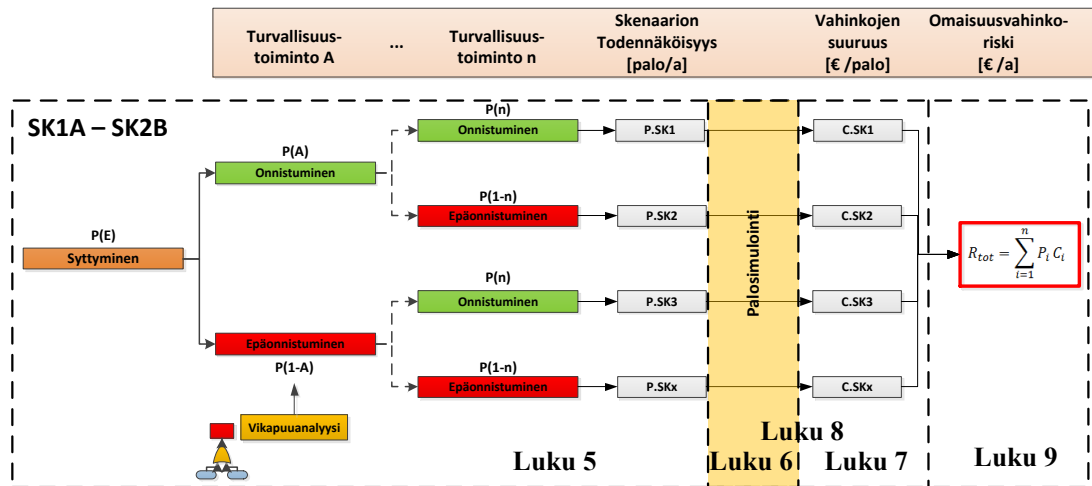
Perustapaus 2 käsittää täysin uuden varastorakennuksen. Vaihtoehdossa 2A tuottille rakennetaan tuotantotiloista erillinen varastorakennus nykyisellä suojaustasolla 2 ja vaihtoehdossa 2B rakennetaan erillinen varastorakennus korotetulla suojaustasolla (automaattinen sprinklerilaitteisto).

4.4 Tapaustutkimuksen eteneminen

Case tapauksessa hyödynnettiin luvussa kaksi esitettyä toiminnallisen palomitoituksen prosessia soveltaen menetelmää vertailevaan riskianalyysiin käyttökelpoiseksi. Poiketen tavanomaisesta rakennusprojektin toiminnallisen palomitoituksen prosessista tässä tapauksessa ei ollut tarpeen määritellä hyväksymiskriteerejä, koska arviointi oli luonteeltaan vertaileva neljän eri toteutusvaihtoehdon välillä. Simulointeja ja analyysyjä edeltävistä riskitarkastelun vaiheista oli aikaisemmin ennen tätä tutkimusta toimitettu tilaajalle alustava riskitarkasteludokumentti, jossa käytiin läpi varaston nykytilanne paloturvallisuuden osalta.

Riskitarkastelun työkaluina hyödynnettiin vika- ja tapahtumapuutarkasteluja (luku 5) sekä palosimulointeja (luku 6). Jokaisesta skenaariokokonaisuudesta muodostettiin oma, erillinen tapahtumapuu, jossa otettiin huomioon eri turvallisuustoimintojen (kohta 5.2) vaikutukset palon kehityksessä. Turvallisuustoimintojen onnistumisen todennäköisyyttä arvioitiin vikapuuanalyyseilla, joiden komponenttien vikaantumisen todennäköisyydet saatiin sekä kirjallisuudesta tilastotietona että palosimulointien perusteella. Alkueräisenä suunnitelmana oli hyödyntää ELMAS -ohjelmistoa todennäköisyystarkastelun kaikissa vaiheissa, mutta ohjelmistoon ei ollut kehitetty vielä tämän tapaiseen tarkasteluun soveltuvaa tapahtumapuulaskentamenetelmää, joten lopulta päädyttiin käyttämään perinteisiä taulukkolaskentaohjelmia.

Kaikki skenaariokokonaisuudet mukaan lukien tapahtumapuutarkastelun tuloksena syntyi useita kymmeniä paloskenaarioita. Simuloitaviksi skenaarioiksi valittiin tapahtumat, joiden avulla pystyttiin arvioimaan puuttuvat todennäköisyydet ja kaikkien muiden skenaarioiden aiheuttamat seuraukset. Seuraukset luokiteltiin eri vahinkotyyppeihin (luku 7), joiden rahallinen arvo [€] määritettiin yhdessä tilaajan kanssa. Vahinkotyyppien toteutumista arvioitiin palosimuloinnein. Tässä tutkimuksessa taloudelliset luvut kuitenkin pidettiin salaisena, joten eri vaihtoehtojen vertailu käytiin läpi riskisuhdelukuja käyttäen. Palosimulointien avulla tarkasteltiin vahinkotyyppien toteutumista, kuten savun leviämistä ja savun aiheuttamia vaurioita, palon kehittymisnopeutta, rakenteiden vaurioitumista sekä alkusammutuksen, sammutuslaitteiston ja palokunnan vaikutusta palon kehitykseen ja vahinkoihin (luku 8). Case -tapauksen etenemistä ja tulevien lukujen nivoutumista toisiinsa on havainnollistettu kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Case -tapauksen tarkastelun eteneminen.

Lopputuloksena yhdelle skenaariolle määritettiin kvantitatiivisesti todennäköisyyden ja seurauksen tulo mukainen vuosittainen riski. Yksittäisten skenaarioiden tuottamien riskien summa muodostaa määrällisen arvon vuosittaiselle kokonaisriskille, joiden suuruutta vertailtiin keskenään eri skenaariokokonaisuuksien välillä (luku 9). Lisäksi tehtiin muutamia herkkyystarkasteluita.

5 TODENNÄKÖISYYKSIEN MÄÄRITYKSEN PERIAATTEET

5.1 Palon syttyminen

Tulipalo syttyy usein varomattoman tai huolimattoman ihmisen toiminnan seurauksena. Tiloissa tehdyn kohdekäynnin perusteella arvioitiin potentiaalisia syttymislähteitä, joista palo mahdollisesti saa alkunsa. Tapahtumapuutarkasteluja varten arvioitiin myös varaston tilastollista syttymistäajuutta.

5.1.1 Potentiaaliset syttymislähteet

Varastotiloissa havaittiin useita potentiaalisia syttymislähteitä. Eräs tyypillisimmistä syistä olivat sähkötrukit, jotka sähkövian ilmetessä voivat syttyä palamaan lähes missä kohdin varastoa tahansa. Trukkeja käytetään tuotelavojen siirroissa varastohyllyihin ja rekkoihin, mutta säilytys ja lataus tapahtuvat myös samoissa tiloissa, joka entisestään lisää syttymisen todennäköisyyttä luoden varastoon ympärivuorokautisen uhan. Ajo-neuvoissa ei myöskään ollut sillä hetkellä asianmukaisia käsisammuttimia, jolloin palon syttyessä kuljettaja joutuisi noutamaan sammutusvälineet kauempaa mahdollistaen palon kehityksen alkusammutukselle liian suureksi.

Rekka-autoista leviävä palo varastoon voidaan myös pitää mahdollisena, koska lastaustaskuja ei ole erikseen palo-osastoitu varastotiloista. Rekkojen lastaus tapahtuu kahden lastaustaskun kautta, jolloin lastatussa rekassa voi olla jopa varaston suuruinen palokuormatiheys. Rekan syttyminen voi johtua esimerkiksi sähköviasta tai hydraulikkaletkujen vuodoista.

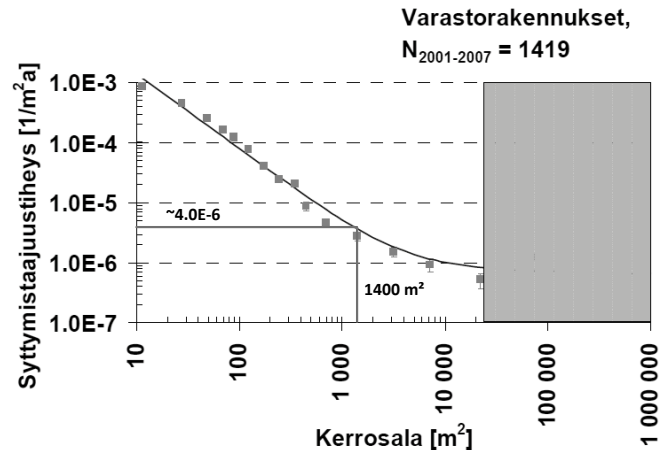
Varastotiloissa säilytetään ja käytetään myös erilaisia pakkaukseen liittyviä robotteja, jotka sisältävät ja pitävät ympärillään helposti syttyvää palokuormaa. Robotin moottorin vioittumisesta aiheutuva koneen kuumentuminen ja hienojakoinen palava materiaali ovat vaarallinen yhdistelmä.

Muita tiloihin kohdistuvia syttymisriskejä havaittiin lisäksi olevan sähkökaapelit ja -kaapit, tulitöistä aiheutuva materiaalien lämpeneminen ja kipinäinti sekä muista palo-osastoista leviävä palo, koska palo-ovien havaittiin joissain tapauksissa olevan yhtäjaksoisesti auki pidempiäkin aikoja.

5.1.2 Syttymisen todennäköisyys

Syttymisen todennäköisyyttä arvioitiin pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastojärjestelmän (PRONTO) -tietokantaan vuosien 2001 – 2007 aikana kerättyjen rakennus-

paloihin liittyvien tilastojen avulla. Kuvassa 5.1 on arvioitu varastopalon syttymisen todennäköisyyttä kerrosalan funktiona. Tilastoihin on kerätty paloja, joissa rakennuksen rakenteet tai irtaimisto ovat syttyneet palamaan, jolloin syttymisellä tässä tapauksessa tarkoitetaan vakiintunutta syttymää eli palo ei sammu itsestään. Oikean reunan harmaalla alueella havaintoja on tilastoissa ollut niin vähän, ettei syttymistäajuustiheydestä voida tehdä päätelmiä riittävällä tarkkuudella. (Tillander 2009)



Kuva 5.1. Varastopalon syttymisen todennäköisyys pinta-alan funktiona. (Tillander 2009, s. 24)

Kuvaajan perusteella palon syttymistäajuustiheys tilassa neliometriä kohden on noin $4\text{E-}6/\text{a}$, joka merkitsee varaston pinta-alalla kerrottuna syttymistäajuutta $0,0056\text{ 1/a}$ (syttyminen kerran 179 vuodessa). Tässä tarkastelussa tarkasteltiin kuitenkin vain nopeasti tai erittäin nopeasti kehittyviä paloja, jotka kattavat 70 % palotapauksista. (RIL 221 - 2003) Tarkastellun kaltaista vakavan palon syttymistäajuutta alennettiin kertoimella 0,7, jolloin lopulliseksi syttymisen todennäköisyydeksi saatiin $0,00392\text{ 1/a}$ (vakava palo kerran 255 vuodessa). Vaikka syttymisen todennäköisyys vaikuttaa varsin pieneltä, tilannetta kannattaa kuitenkin peilata siten, että yksi varasto 255 mahdollisesta palaisi kerran vuodessa, joka Suomen mittakaavassa on jo huomattava.

5.2 Turvallisuustoiminnot

Turvallisuustoimintojen luotettavuutta arvioitiin tilastojen ja osin simulaatioiden tuottaman tiedon perusteella. Tapahtumapuutarkasteluja varten selvitettiin luotettavuudet palo-osastoinneille, paloilmoin- ja sprinklerijärjestelmälle sekä onnistumisen todennäköisyydet alkusammutukselle ja palokunnan sammutushyökkäykselle. Turvallisuustoiminnoille määritetyt luotettavuudet on esitetty kootusti taulukossa 5.1.

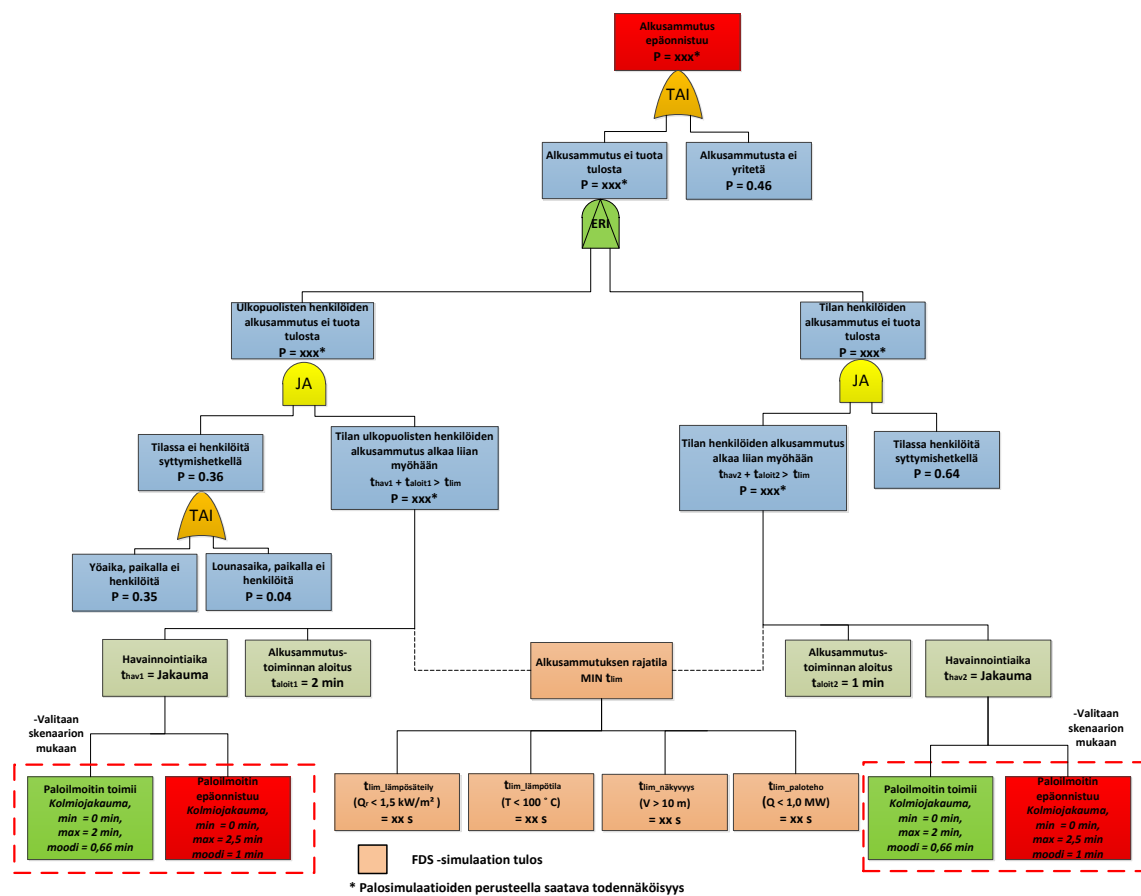
5.2.1 Paloilmoinjärjestelmä

Paloilmoinjärjestelmän luotettavuutta arvioitiin tilastotietojen perusteella. Näytteenottoilmaisimien luotettavuudeksi valittiin toimintavarmuusluokan 3 mukainen arvo **0,95**. (RIL 221 - 2003, s. 67)

5.2.2 Alkusammutus

Alkusammutuksessa tapahtuu epäonnistuminen, kun sammutusta ei yritetä tai yrityksestä huolimatta palo jatkaa etenemistään. Varastopaloihin liittyvien tilastotietojen perusteella alkusammutusta ei yritetä 46 % tapauksista. (Tillander 2009, s. 64)

Kun alkusammutusta yritetään, tarkastelu jaettiin tapauksiin, joissa tilassa oleva henkilö tai tilan ulkopuolinen henkilö epäonnistuvat alkusammutusyrityksessä. Näiden tapausten todennäköisyyksien suhdetta tarkasteltiin painotettuna keskiarvona, jonka suuruus riippui vuorokautisesta ajallisesta läsnäolosta tuotevarastossa. Tilassa oletettiin olevan palon syttymishetkellä henkilöitä paikalla kaikkina muina aikoina paitsi yö- ja lounasaikaan, joten todennäköisyys paikallaololle oli 64 % kuvan 5.2 mukaisesti.

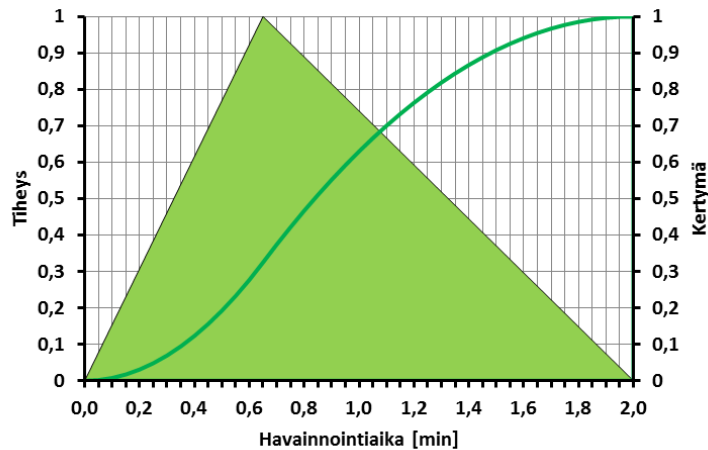


Kuva 5.2. Alkusammutuksen vikapuumalli.

Alkusammutusyritys epäonnistuu, kun havaintoaika ja alkusammutuksen alkuun kuluva aika yhdessä ylittävät rajatilaolosuhteiden kehittymiseen kuluvan ajan. Alkusammutuksen rajatilan ylittyessä olosuhteet eivät mahdollista enää palon lähestymistä tai paloteho on liian suuri alkusammutuskalustolla sammutettavaksi. Palotehon osalta onnistumisen raja-arvona pidettiin 1 MW paloa. (Houlding & Rew 2003) Olosuhteet sammutustoiminnan kannalta olivat puolestaan mahdottomat, jos kolmen metrin etäi-

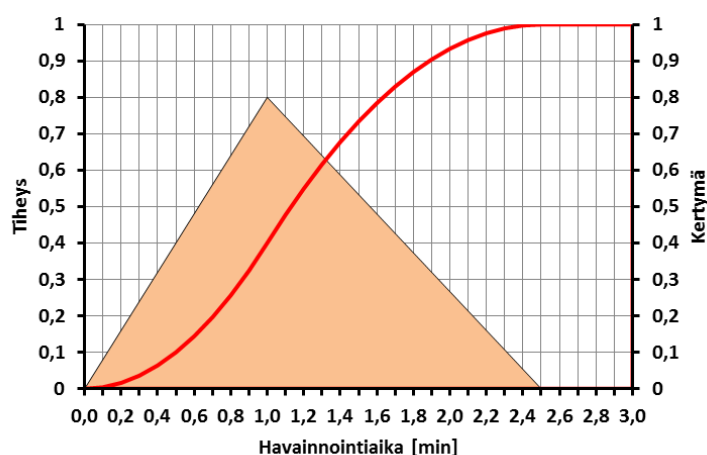
syydellä pään korkeudella (2 m) ylitettiin lämpösäteily-¹, lämpötila-² tai näkyvyyskriteeri ($1,5 \text{ kW/m}^2$, 100 °C , 10 m). Lämpösäteilyn raja-arvoa voidaan pitää turvarajana henkilöturvallisuudelle, koska esimerkiksi lämpösäteilyn intensiteetti 1 kW/m^2 vastaa likimain suurinta auringon lämpösäteilyn intensiteettiä Maan pinnalle.

Havainnointiajan pituutta kuvattiin kolmiojakauman avulla keston riippuessa paloilmoitinjärjestelmän toiminnasta kuvien 5.3 ja 5.4 mukaisesti. Testisimulaatioiden perusteella ensimmäiset savuilmamaisimet aktivoituivat noin puolen minuutin kuluttua palon syttymishetkestä, joten havainnointiajan keskiarvoksi valittiin 40 sekuntia.



Kuva 5.3. Havaintoaajan todennäköisyysjakauma paloilmoitinjärjestelmän toimiessa.

Ilman paloilmamaisimia havainnointiajan oletettiin kestävän kauemmin. Keskiarvoksi valittiin yksi minuutti, mitä pidettiin riittävänä aikana havainnoida palo tilan työntekijöiltä tai valvomohenkilökunnalta visuaalisesti (vertaa kuva 8.1). Pisimmäksi mahdolliseksi havainnointiajaksi arvioitiin 2,5 minuuttia, jolloin sprinklereiden aktivoituminen viimeistään herättää huomion.



Kuva 5.4. Havaintoaajan todennäköisyysjakauma paloilmoittimen epäonnistuessa.

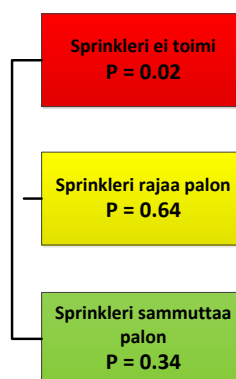
¹ Tukes 2013, s. 17, ² RIL 221-2003, s. 58

Palohavainnon jälkeen aikaa kuluu mm. sammutuskaluston noutoon ennen kuin varsinainen sammutusyritys pystytään aloittamaan. Tilassa olevien henkilöiden tapauksessa sammutuksen valmisteluun kuluvaksi ajaksi valittiin yksi minuutti perustuen varastotilan sisäiseen lyhyeen kävelymatkaan ja koulutettuun henkilökuntaan. Muista tiloista saavuttaessa valmisteluajaksi valittiin kaksi minuuttia. Minuutin ajallisen lisäyksen perusteena oli noin 60 metrin kävelymatka (nopeus 1 m/s) valvomotiloista palon syttymispaikalle.

Alkusammutuksen vikapuun lopulliset todennäköisyydet ratkaistiin palosimulaatioiden tuottamien tulosten perusteella, kun rajatilaolosuhteet olivat selvillä. Alkusammutuksen epäonnistumiselle saatiin kaksi eri todennäköisyyttä paloilmoittimen toiminnasta riippuen.

5.2.3 Automaattinen sammutusjärjestelmä (sprinkleri)

Sprinklerijärjestelmän luotettavuutta tarkasteltiin tilastojen perusteella. Sprinklerin täysvikaantumisen todennäköisyydeksi arvioitiin **0,02** toimintavarmuusluokan ollessa 3 (RIL 221 - 2003, s.67). Järjestelmän luotettavuutta ei pilkottu komponentteihin, vaan vikaantumisen ajateltiin olevan koko järjestelmän suuruinen, jolloin vettä ei tule mistään suuttimesta. Tällainen vika voi aiheutua esimerkiksi vesilähteen tai pumpun viasta, tai suljetusta venttiilistä.



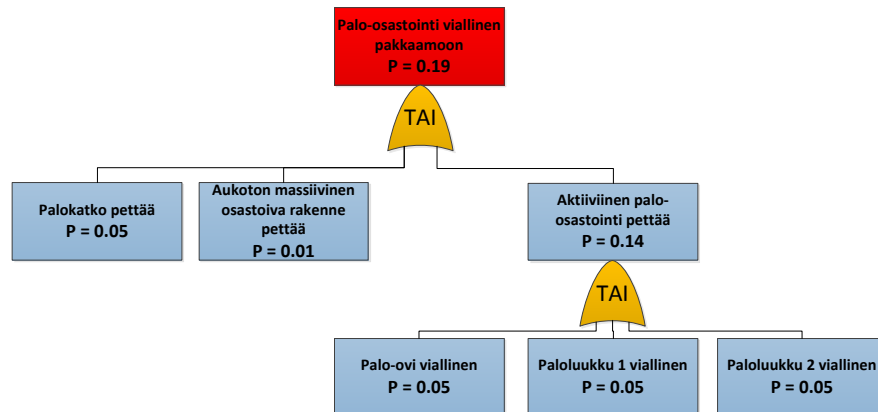
Kuva 5.5. *Sprinklerijärjestelmän toiminnan todennäköisyydet.*

Sprinklerijärjestelmän onnistuessa toiminta jaettiin vielä paloa rajoittavaan (64 % todennäköisyys) ja sammuttavaan (34 %) osaan (Bukowski 2002), jolloin pystyttiin arvioimaan esimerkiksi savuvahinkojen laajuus yksityiskohtaisemmin kohteen eri tiloissa.

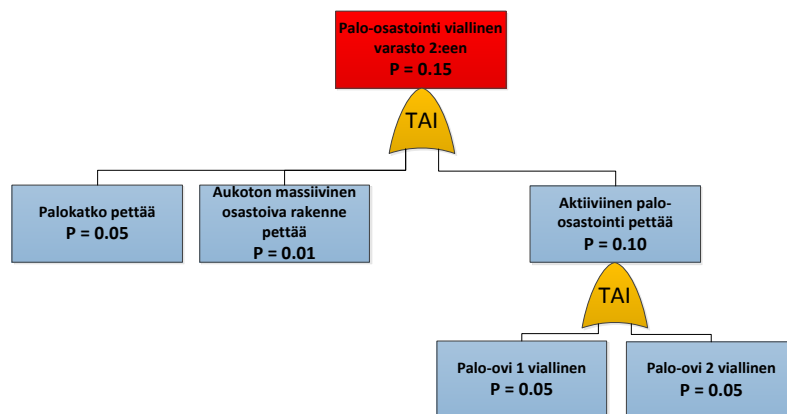
5.2.4 Palo-osastointi

Palo-osastointien luotettavuutta arvioitiin erikseen sekä pakkaamohallin että viereisen tuotevaraston välisille seinille vikapuutarkasteluilla, joiden todennäköisyyksinä käytettiin RIL 221 - 2003 (s. 67) mukaisia arvoja. Poikkeaman osastoivien seinien luotetta-

vuuksille aiheuttivat aktiivisen palo-osastoinnin pettäminen, koska suljinlaitteistoilla olevia palo-ovia ja luukkuja on palo-osastoivissa seinissä eri määrä.



Kuva 5.6. Vikapuu palo-osastoinnille pakkaushalliin.



Kuva 5.7. Vikapuu palo-osastoinnille varasto 2:een.

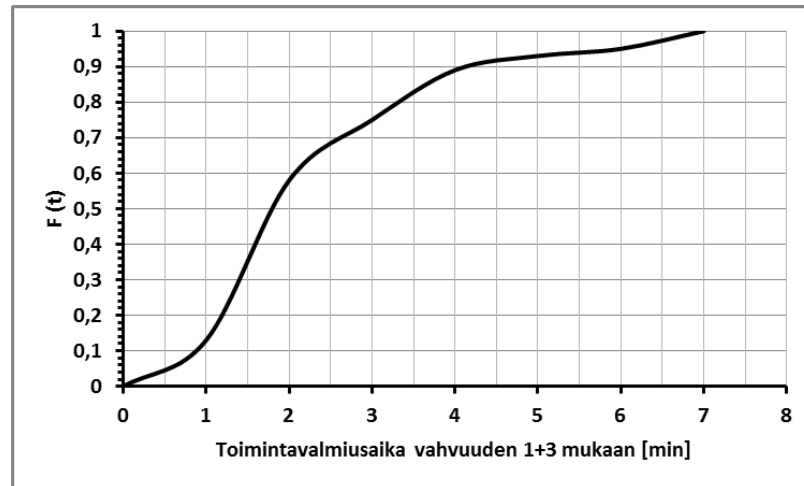
Vikapuiden huipputapahtumien perusteella palo-osastoinnin epäonnistumisen todennäköisyys pakkaushallin suuntaan oli **0,19** ja varastoon **0,15**. Erillisen varaston tapauksissa (SK2A ja SK2B) varasto rakennetaan oletusarvoisesti tarpeeksi etäälle varsinaisesta tehdasrakennuksesta, jolloin palo-osastoinnin onnistumisen todennäköisyys on 1.

5.2.5 Palokunnan sammutustyö

Viimeisenä turvallisuustoimintona arvioitiin palokunnan sammutushyökkäyksen onnistumista. Sammutuksen onnistumisen todennäköisyys riippuu havainnointiajasta (paloilmoitin tai muu tiedonsaanti), toimintavalmiusajasta sekä paikan päällä tapahtuvasta tiedustelusta ja selvityksestä ennen sammutushyökkäystä. Paloilmoitinjärjestelmän toimiessa hälytys hätäkeskukseen kulkee automaattisesti ilmaisimen lauetessa, jolloin viive hälytyshetkeen oli alustavien simulaatioiden perusteella puoli minuuttia. Paloilmoittimen epäonnistuessa hälytys palokunnalle saadaan sprinklerin lauetessa tai henkilökunnan soitosta, jolloin viiveeksi arvioitiin 2,5 min.

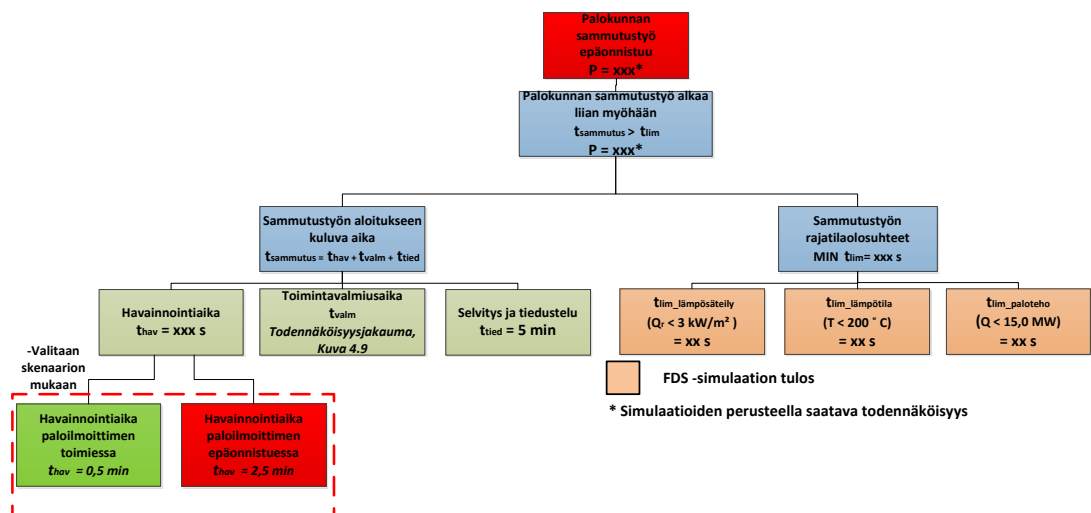
Palokunnan toimintavalmiusaika lasketaan ensimmäisen ajoneuvon hälyttämisestä siihen hetkeen, kun hälytetty vahvuus on tapahtumapaikalla. Toimintavalmiusaikana

käytettiin tilastojen perusteella saatua kuvan 5.8 mukaista toimintavalmiusaikajakaumaa. Tilastojen perusteella 95 % fraktiili oli noin 6,5 minuuttia, joka vastasi hyvin yrityksen omaa kokemusta kuuden minuutin toimintavalmiusajasta. Varsinaisen toimintavalmiusajan lisäksi palokunnan katsottiin tarvitsevan 5 minuuttia selvitys- ja tiedustelu-aikaa ennen sammutushyökkäyksen aloittamista.



Kuva 5.8. Palokunnan toimintavalmiusaika. (muokattu Tillander 2009)

Palokunnan sammutushyökkäyksen onnistumiskriteerinä käytetään sammutusolosuhteita tai palotehoa 15 MW^2 . Olosuhdekriteereinä sammutustoiminnalle asetettiin lämpötila ja lämpösäteily ($200 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 kW/m^2) 10 metrin etäisyydellä palosta. Sammutustoiminta varastossa on muutenkin erittäin haasteellista, sillä hyllyjen kaatumisvaaran vuoksi sammutus lähellä palopesäketä ei ole mahdollista. Palokunnan sammutuksen vikapuu on esitetty kuvassa 5.9.



Kuva 5.9. Palokunnan sammutustoiminnan onnistumisen todennäköisyyden arviointiperusteet.

¹ Tukes 2013, s. 17, ² RIL 221-2003, s. 54

Alkusammutuksen vikapuun tavoin palokunnan sammutuksen onnistumisen todennäköisyys selvitettiin palosimulaatioiden jälkeen, kun rajatilaolosuhteet sammutustyölle olivat selvillä. Tässä tarkastelussa palokunnan sammutustyön onnistuminen tarkoitti sammutushyökkäyksen onnistumista. Jos ensimmäinen sammutushyökkäys epäonnistuu, palo pääsee hallitsemattomaan tilaan, jolloin palokunnan ainoaksi tehtäväksi jää täydellisen tuhon välttäminen. Palokunnan sammutuksen epäonnistumiselle saatiin kaksi eri todennäköisyyttä paloilmioittimen toiminnasta riippuen.

Taulukko 5.1. *Turvallisuustoimintojen arvioidut epäonnistumisen todennäköisyydet.*

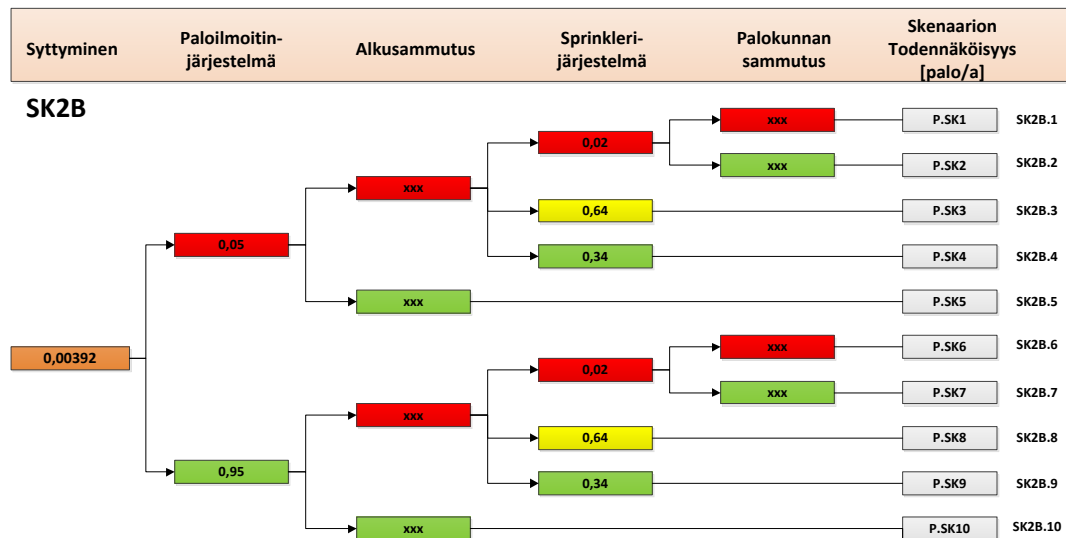
<i>Tunnus</i>	<i>Selite</i>	<i>Määrittäysperuste</i>	<i>Todennäköisyys</i>
PI	Paloilmoitinjärjestelmän vikaantuminen	Taulukko	0,05
AS1	Alkusammutuksen epäonnistuminen, kun paloilmioitin vikaantuu	Vikapuu + FDS	FDS tulokset
AS2	Alkusammutuksen epäonnistuminen, kun paloilmioitin toimii	Vikapuu + FDS	FDS tulokset
SPRKL_fail	Sprinklerin täysvikaantuminen	Taulukko	0,02
SPRKL_ctrl	Sprinkleri rajaa palon	Taulukko	0,64
SPRKL_ext	Sprinkleri sammuttaa palon	Taulukko	0,34
POT	Palo-osastoinnin epäonnistuminen tuotantoon	Vikapuu	0,19
POV	Palo-osastoinnin epäonnistuminen viereiseen varastoon	Vikapuu	0,15
PK1	Palokunnan epäonnistuminen, kun paloilmioitin vikaantuu	FDS	FDS tulokset
PK2	Palokunnan epäonnistuminen, kun paloilmioitin toimii	FDS	FDS tulokset

5.3 Ratkaisuvaihtoehtojen tapahtumapuut

Edellisessä luvussa esitettyjen turvallisuustoimintojen luotettavuuksien perusteella muodostettiin tapahtumapuut jokaiselle neljälle skenaariokokonaisuudelle SK1A - SK2B. Tapahtumapuuanalyysi on looginen kuvaus, jonka peruslähtökohtana on alkutapahtumana oleva palon syttyminen. Alkutapahtuman todennäköisyyttä alentavat turvallisuustoiminnot, joita tuotevaraston tapauksessa ovat alkusammutus, sprinklerijärjestelmä, palo-osastoinnit tuotantoon ja varastoon sekä palokunnan toiminta. Jokaisessa tapahtumapuun haarassa onnistumisen ja epäonnistumisen todennäköisyyksien summan on oltava 1.

Skenaariokokonaisuuksissa 1A ja 2A sprinklerijärjestelmää ei ole asennettu, jolloin tapahtumapuun haarojen (yksittäisten skenaarioiden) määrä on alhaisempi, kuin vastavissa B -tapauksissa. Toisaalta skenaariokokonaisuuksissa 2A ja 2B varastorakennus on erillisenä rakennuksena muista tuotantotiloista, jolloin palo-osastointien luotettavuutta viereisiin tiloihin ei ole tarpeen tarkastella.

Kuvassa 5.10 on havainnollistettu tapahtumapuun periaatetta skenaariokokonaisuuden 2B osalta, jossa vihreät laatikot edustavat onnistumista ja punaiset laatikot epäonnistumisen todennäköisyyttä. Sprinklerijärjestelmän osalta toiminta on jaettu kolmeen osaan; täysvikaantuminen (punainen), sprinkleri rajaa palon (keltainen) ja sprinkleri sammuttaa palon (vihreä). Muiden skenaariokokonaisuuksien tapahtumapuut todennäköisyyksineen on esitetty taulukkomuodossa liitteessä 1.



Kuva 5.10. Tapahtumapuuta skenaariokokonaisuudessa SK2B (sprinklerijärjestelmällä varustettu erillinen varastorakennus).

Tapahtumapuiden lopulliset todennäköisyydet laskettiin vasta simulaatioiden jälkeen, koska alkusammutuksen ja palokunnan onnistumisen todennäköisyydet olivat riippuvaisia simulaatioiden tuottamista tuloksista. Tästä syystä osassa kuvan 5.10 laati-koista numeroarvojen sijasta ovat rastit.

5.4 Simuloitavat paloskenaariot

Skenaarioiden yhteenlaskettu lukumäärä skenaariokokonaisuuksissa SK1A - SK2B oli 80 skenaariota (liite 1). Ei ollut mielekästä, eikä myöskään tarpeellista simuloida kaikkia paloskenaarioita, koska useissa skenaariotapauksissa seuraukset ovat selvät tai tarkasteltava tilanne on hyvin samankaltainen useisiin muihin skenaarioihin verrattuna. Nykyisen varastorakennuksen SK1A tapaukset vastasivat toteutusvaihtoehdon SK1B tilanteita, joissa sprinklerissä tapahtui täysvikaantuminen. Samalla logiikalla simuloimatta jätettiin myös erillisen varastorakennuksen toteutusvaihtoehdot, koska ne vastasivat onnistunutta palo-osastointia tuotantotilaan ja varastoon 2 nykyisessä varastorakennuksessa.

Simuloitaviksi skenaarioiksi valittiin lopulta taulukon 5.2 mukaiset palotapaukset toteutusvaihtoehdosta SK1B (46 tapausta). Valinnan perusteena ei tässä tapauksessa ollut teoriaosuuden mukainen pahin, realistinen tilanne, koska tutkimuksessa ei ollut tarkoitus etsiä mitoitettavinta tilannetta, vaan selvittää kokonaisvaltaisesti seurausten suuruus. Ensimmäisessä perustapauksessa (SK1B.7) alkusammutus ja sprinklerijärjestelmä eivät toimi (tai sprinkleriä ei ole), mutta palo-osastointi viereisiin tiloihin onnistuu. Toisessa perustapauksessa (SK1B.26) paloilmoitin ja palo-osastointi varastoon 2 toimivat, mutta sprinklerijärjestelmä ja palo-osastointi pakkaustiloihin eivät. Kolmannessa skenaariossa (SK1B.29) palokunnan sammutushyökkäys onnistuu, mutta palo-osastointi varastoon 2 ei. Neljännessä skenaariossa (SK1B.35) alkusammutuksen epäonnistuessa sprinkleri rajaa palon, mutta palo-osastointi pakkaustiloihin epäonnistuu avoimen palo-

oven kautta. Viidennessä mallinnettavassa skenaariossa (SK1B.45) sprinkleri sammuttaa palon ja palo-osastoinnit molempiin tiloihin ovat kunnossa.

Taulukko 5.2. *Simuloitavat paloskenaariot.*

<i>Lyhenne</i>	<i>Selite</i>	<i>Paloilmoitin</i>	<i>Alkusammutus</i>	<i>Sprinkleri</i>	<i>Palo-osastointi pakkaustiloihin</i>	<i>Palo-osastointi varastoon 2</i>	<i>Palokunnan toiminta</i>
SK1B.7	1. Sprinklerivika.	EI	EI	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	EI
SK1B.26	2. Sprinklerivika + viallinen osastointi pakkaamoon.	KYLLÄ	EI	EI	EI	KYLLÄ	EI
SK1B.29	3. Sprinklerivika + viallinen osastointi varastossa 2, palokunta onnistuu	KYLLÄ	EI	EI	KYLLÄ	EI	KYLLÄ
SK1B.35	4. Sprinkleri rajoittaa palon + viallinen osastointi pakkaamoon.	KYLLÄ	EI	RAJAA	EI	KYLLÄ	12 min
SK1B.45	5. Sprinkleri sammuttaa palon.	KYLLÄ	EI	KYLLÄ	KYLLÄ	KYLLÄ	12 min

Skenaarioissa SK1B.7 ja SK1B.26, joissa sammutustoimenpiteillä ei vaikutettu palon etenemiseen, simulointeja jatkettiin yleissyttymispisteeseen saakka. Skenaarioita ei ollut tarpeen simuloida rajahetkestä eteenpäin, koska seurausten kannalta tarkasteltuna palokunnan epäonnistuessa rakennuksen oletettiin tuhoutuvan lähes kokonaan. Sprinklerin sisältävissä skenaarioissa palokunta onnistui aina sammutustyössä, mutta toiminta-ajalla oli silti merkitystä, kun tarkasteltiin savunpoiston merkitystä savuvahinkojen laajuudelle.

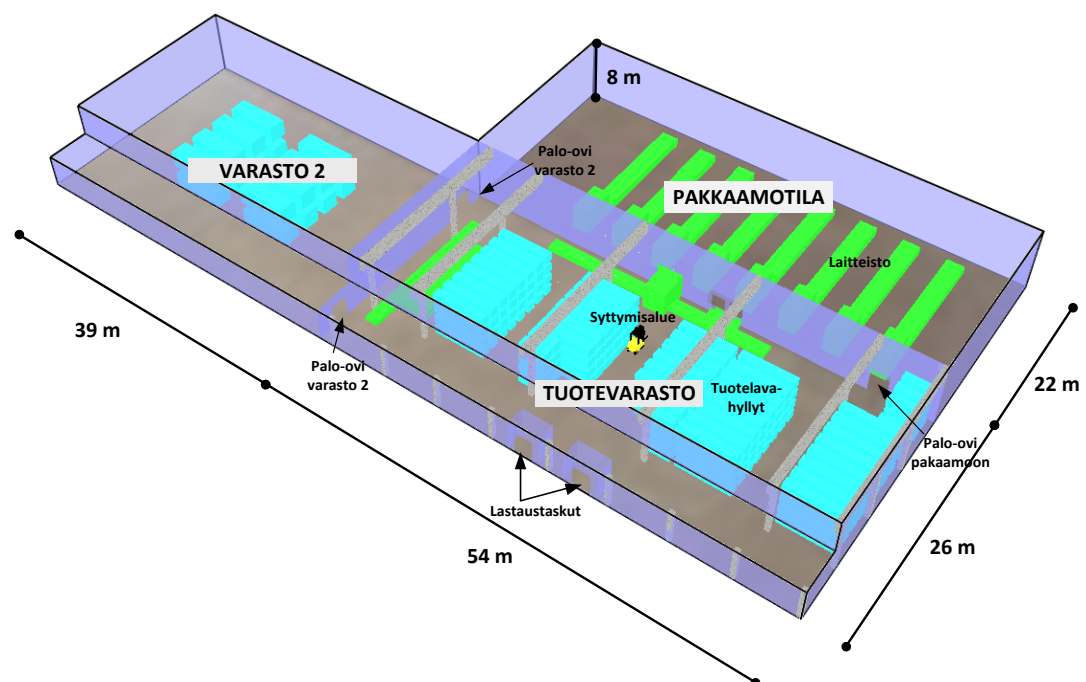
6 PALOSIMULOINTIMALLI

6.1 Ohjelmisto

Palosimulointien suorituksessa käytettiin kenttämalliohjelmistoa FDS (ohjelmistoversio 6.0.1). Syötetietojen luonnissa hyödynnettiin lisäksi Pyrosimia ja normaalia tekstieditoria sekä tulosten käsittelyssä Smokeview -visualisointiohjelmaa (versio 6.1.5).

6.2 Geometria ja rakenteet

Palosimulointimalli koostui tuotevarastosta sekä siihen palo-osastoivin seinin liittyvistä viereisestä varastosta ja pakkaamotilasta. Geometrialtaan malli noudatteli lähtötietojen mukaisia todellisia dimensioita. Joiltakin osin jouduttiin tekemään tilannetta idealisoivia yksinkertaistuksia, koska geometrisesti tarkan todellisuutta vastaavan laskentamallin luominen vaatii erittäin pienen hilakoppikoon. Esimerkiksi jännitetyin teräsbetonipalkein kannatettu kattorakenne mallinnettiin tasakattona, vaikka rakenne on lievästi kalteva.



Kuva 6.1. Palosimulaatiomallin geometria.

Tiloja rajaavat palo-osastoivat rakenteet mallinnettiin termisiltä ominaisuuksiltaan vastaamaan nykyisiä palo-osastointeja. Taulukkoihin 6.1 ja 6.2 on koottu informaatio

tuotevaraston simuloinneissa käytetyistä materiaaleista ja rakenneosista, joiden sijainnit on esitetty kuvassa 4.1. Paloon osallistumattomilla pilareilla, palkeilla ja laitteilla vaikutettiin lisäksi savun etenemiseen.

Taulukko 6.1. *Rakenneosien materiaaliominaisuudet.*

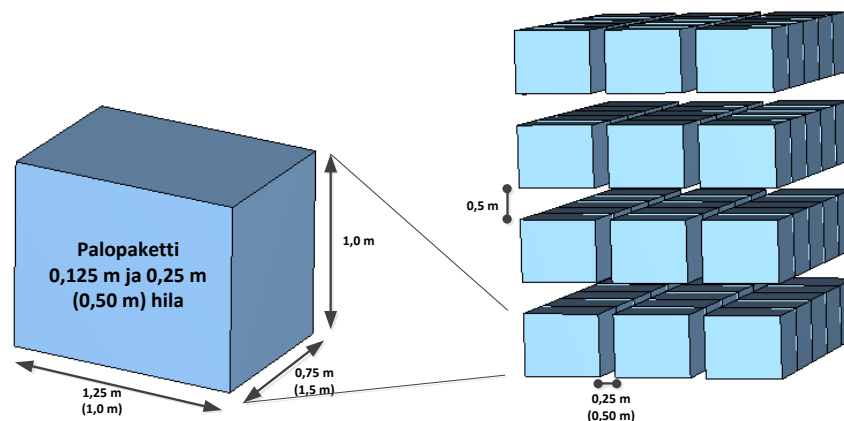
Materiaali	ρ [kg/m ³]	c [kJ/(kg K)]	k [W/(m K)]	Lähde
Betoni	2280	1,04	1,8	Peacock, 1988
EPS	30	1,5	0,034	Yucel, 2004
Kivivilla	100	0,8	0,04	Hietaniemi, 2005b
Kevytsandwichelementin teräsohutlevypinta	7850	0,46	45,8	Drysdale, 2000

Taulukko 6.2. *Palosimulaatiomallin rakenteet.*

Nro	Rakenneosa	Palonkesto-luokka	Rakenne-paksuus	Mallinnettava rakenne sisältä ulos
1	US	-	175 mm	Kevytsandwichelementti
2	US/VS	EI 120	340 mm	Betonisandwich (100 mm betoni + 165 mm eriste + 80 mm betoni)
3	VS	EI 120	200 mm	Kevytsandwichelementti
4	VS	EI-M 90	275 mm	175 mm kevytsandwichelementti + 100 mm betonikuori
5	AP	-	150 mm	Teräsbetoni-laatta
6	YP	REI 120	505 mm	265 mm ontelolaatta + 240 mm lämmöneriste

Alapohjaa lukuun ottamatta taulukon 6.2 rakenneosat mallinnettiin kerroksellisin rakenteina, jolloin ne koostuivat useimmista materiaaleista. Rakenneosat eivät itsessään pala, mutta lämmönsiirtymistä edistävinä ja savun leviämistä estävinä rakenteina ne osallistuivat palon kulkuun.

Molemmat lastaustaskut pidettiin simulaatioiden ajan auki korvausilman saannin vuoksi. Rakenteissa olevien palo-ovien, kuljetusluukkujen sekä savunpoistoluukkujen aukioloa sen sijaan kontrolloitiin skenaariokohtaisesti. Hilaverkkojaon vuoksi tilojen väliset 2,7 m korkeat aukot olivat laskentamallissa 3,0 m korkeita. Mallin tuottama pyöristys oli kuitenkin yhteismitallinen kaikissa simulaatioissa ja varmallalla puolella arvioitaessa savun laskeutumista ja leviämistä viereisiin tiloihin.



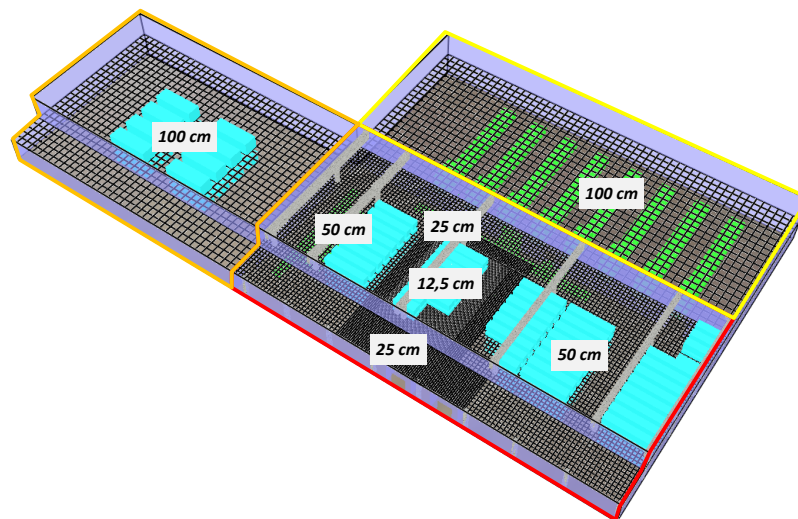
Kuva 6.2. *Palopakettien geometrinen mallinnus ja sijoittuminen eri hilaverkoilla.*

Tuotelavojen yksinkertaistettu geometria noudatteli kuvan 6.2 mukaista periaatetta. Tuotelava mallinnettiin yksittäisenä palopakettina, jonka dimensiot vaihtelivat hilakoppikoon mukaan palokuorman suuruuden kuitenkin säilyessä muuttumattomana. Yhdessä palopaketit muodostivat syväkuormaushyllykokonaisuuden. Mallinnuksessa varaston palokuorma oletettiin pahimman mahdollisen tapauksen perusteella täydeksi.

Mallinnuksen yhtenä rajoitteena oli tuotelavojen pysyminen palon aikana omilla paikoillaan. Todellisuudessa varastohyllyt romahtavat teräksisten kannatintelineiden pettäessä kovassa kuumuudessa. Ilmiö oli käytännössä mahdollinen niissä skenaarioissa, joissa sprinkleri vikaantuu.

6.3 Hilaverkko

Palosimulaatiomallin hilaverkkojako on esitetty kuvassa 6.3. Riittävää hilakoppikokoa arvioitaessa hyödynnettiin kaavaa (6), jossa ominaisläpimitan arvoksi D^* saatiin noin 2 normaaleissa ympäristöolosuhteissa, kun palotehon suuruutena käytettiin sprinklerin rajaaman ja sammuttavan paloskenaarion maksimipalotehoa 1500 kW. Kun paloalueen lähistöllä hilakoppikokoon suuruudeksi valittiin 0,125 m, ominaisläpimitan ja hilakopin sivumitan suhteeksi eli resoluutioksi saatiin noin 10, mikä tässä tapauksessa oli riittävä tarkkuus simulointien suoritusta varten. Tuotevaraston ulommilla alueilla hilakoppikokoa suurennettiin asteittain joko 25 cm tai 50 cm suuruuteen. Viereiset tilat mallinnettiin harvalla 100 cm hilalla havainnollistamaan lähinnä savun leviämistä.



Kuva 6.3. Palosimulaatiomallin hilaverkkojako.

Sprinklerin sisältävissä paloskenaarioissa 12,5 cm hilakokoa käytettiin ainoastaan 6 x 6 m² kokoisella alueella syttymispisteen kohdalla, koska palosimulointien laskentaajat olisivat muutoin kasvaneet tarpeettoman pitkiksi. Kokonaisen hyllylohkon mallintaminen pienellä hilakoolla ei myöskään ollut tarpeen, koska sprinklerijärjestelmän sisältävissä tapauksissa käytettiin ennalta määrättyä palotehoa toisin kuin yleissyttymis-

pisteeseen etenevässä palossa. Laskennan herkkyystarkastelussa hilakoppikokoa pienennettiin syttymisalueella 6,25 cm:n suuruuteen.

6.4 Paloturvallisuusjärjestelmät

Paloilmaisimet mallinnettiin savusta laukeavina näytteenottoilmaisimina, jotka sijaitsivat katossa 4 metrin etäisyydellä toisistaan. Näytteenottoilmaisinten tapauksessa käytettiin nopean herkkyyden ($RTI\ 50\ m^{1/2}s^{1/2}$) ilmaisimia, joiden laukeamislämpötila oli $68^{\circ}C$.

Sprinklerin aktivoitumiseen kuluvalle ajalla on ratkaiseva merkitys palon kehittymisen kannalta, kuinka suureksi palo kasvaa. Aktivoitumisaika riippuu mm. palon kasvunopeudesta, sprinklereiden sijainnista ja herkkyydestä. Automaattista sammutuslaitteistoa ei ole nykyisessä varastotilassa, joten sprinklerit mallinnettiin kuormaushyllyihin ja kattoon sprinklerisäännön CEA 4001 (2007) mukaisesti. Sprinklerit kuvattiin nopean herkkyyden ($RTI\ 50\ m^{1/2}s^{1/2}$) sprinklereinä, joiden laukeamislämpötila oli $68^{\circ}C$. C-kertoimeksi Tsui (2010, s. 175) suositteli käytettäväksi arvoa 0,65.

Sammutuslaitteiston vesipisarat mallinnettiin myös, koska höyrystyvä vesi viilentää kuumaa savukerrosta ja vaikuttaa näin ollen savun kulkeutumiseen. Sprinkleriskenaarioissa palotehon suuruuteen vaikutettiin kuitenkin ennalta määrättyjen palotehokäyrien avulla, koska FDS -ohjelmistossa sprinklereiden kyky vaikuttaa palon etenemiseen on rajallinen.



Kuva 6.4. Palosimulaatiomallin automaattiset paloturvallisuusjärjestelmät.

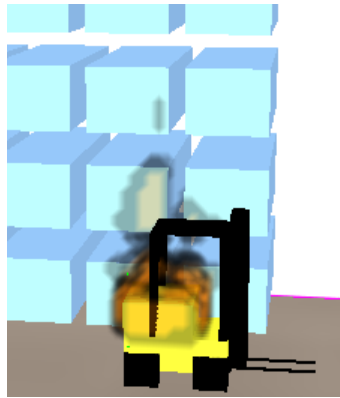
Savunpoisto mallinnettiin painovoimaisena. Savunpoistoluukut (6 kpl tuotevarastossa) avautuivat palokunnan laukaisusta eli ne aktivoituvat ajan hetkellä, kun palokunta aloitti sammutushyökkäyksen (7 min tai 12,5 min).

6.5 Mitoituspalo

Jokaisen paloskenaarion lähtökohtana oli alkupalon vaikutuksesta syttyvä varastohyllyn palopaketti, josta palo leviää muihin palopaketteihin muodostaen koko varaston laajuisen palon. Osassa skenaarioita palon voimakkuuteen ja leviämiseen vaikutettiin aktiivisilla palontorjuntatoimenpiteillä.

6.5.1 Alkupalo

Varaston alkupalona käytettiin trukin sähköviasta aiheutuvaa nopeasti kehittyvää paloa, jolloin palotehon suurin arvo (1 MW) saavutettiin 150 sekunnin kuluttua syttymishetkestä kaavan (1) mukaisesti. Trukki sijaitsi varastohyllyn lähetyvillä, josta palo levisi tuotelavoihin muodostaen koko varaston laajuisen mitoituspalon.



Kuva 6.5. Varastopalon kehittyminen trukin sähköviasta.

Palon alkupisteen sijainniksi valittiin varastotilan keskialue, josta palon leviäminen kaikkiin suuntiin oli mahdollista ja etäisyys alkusammutuskalustoon oli pisimmillään. Tässä tutkimuksessa rajoituttiin tarkastelemaan pelkästään yhtä palon alkupistettä, koska tavoitteena oli selvittää paloriskin suuruus yhdessä ”tyypillisessä” varastopalon tapauksessa. Eri alkupalon sijainti olisi käytännössä vaikuttanut nopeampaan/hitaampaan palopaketin syttymiseen, jonka vaikutusta riskitarkastelun tuloksiin on tarkasteltu kohdassa 9.2.1 herkkyytarkasteluiden yhteydessä. Lisäksi useamman kuin yhden palon sijainnin järjestelmällinen simulointi olisi vaatinut kaikkien skenaariokokonaisuuksien uudelleentarkastelua ja näin ollen entistä laajempaa riskitarkastelua, joten nykyinen laajuus katsottiin riittäväksi.

6.5.2 Yksittäisen palopaketti

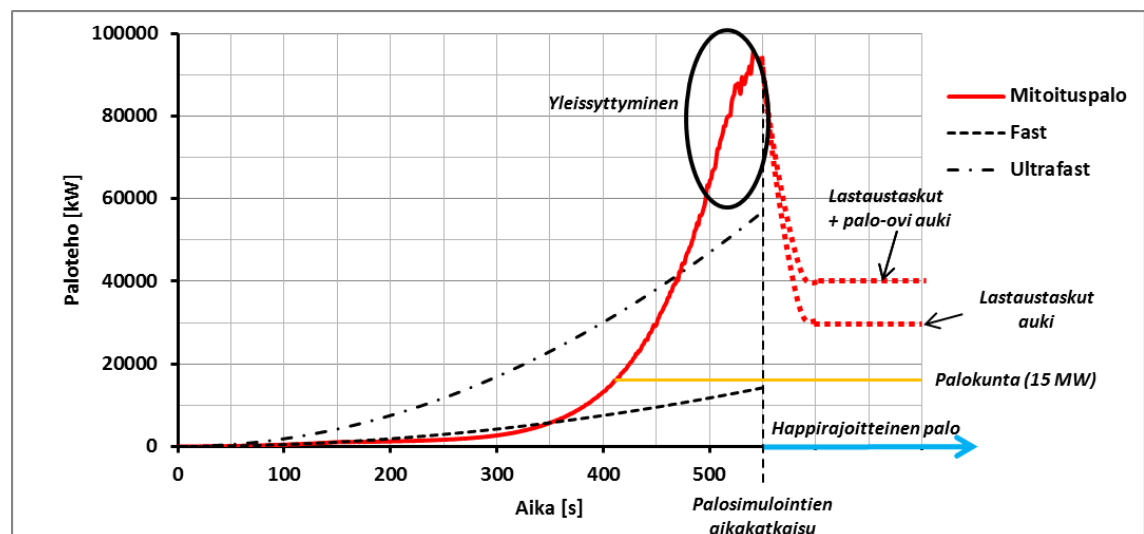
Yhden tuotelavan palokuorma koostui kuormalavasta, pakkausmateriaalista ja varsinaisesta tuotteesta. Tuotelava mallinnettiin palopaketina, jonka poispalaminen oli mahdollinen ilman sammutustoimenpiteitä. Palopaketin termiset ominaisuudet muodostuivat lavalla olevien materiaalien massan painotettuna keskiarvona. Menetelmää käytettiin arvioitaessa paketin lämpöarvo, tiheys, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja

noentuotto. Syttymislämpötilana käytettiin puun syttymislämpötilaa 250 °C (Babrauskas 2003, s. 946).

6.5.3 Varaston mitoituspalo

Tutkimuksen yhteydessä tilaaja oli kiinnostunut tekemään polttokokeen tuotteilleen, jolloin simulaatioissa käytettyä palon kehitystä pystyttiin peilaamaan todellisiin olosuhteisiin. Polttokokeita tehtiin sekä yksittäiselle palopakettille että useiden tuotelavojen kokonaisuuksille. Polttokokeiden numeerinen mittaustieto jäi varsin vähäiseksi, joten tehdyt arviot perustuivat lähinnä visuaalisiin havaintoihin. Esimerkiksi kalorimetrin kaltaisia laitteistoja palotehojen määrittämiseksi ei ollut käytössä. Yhteenvedona tehdyistä kokeista voitiin kuitenkin todeta, että suotuisissa olosuhteissa palo leviäminen tuotelavojen pakkausmateriaalipintoja pitkin on nopeaa, mitä lisäksi edesauttavat ilma-
saannin kannalta suotuisa varastointitapa.

Tehtyjen havaintojen ja aikaisempien historiassa tapahtuneiden materiaaaliltaan ja geometrialtaan samantyyppisten palojen perusteella palonkehitys varastotilassa arvioitiin lopulta olevan luonteeltaan nopean (fast) ja erittäin nopean (ultra fast) välillä kuvan 6.6 mukaisesti.



Kuva 6.6. Tuotelavojen mitoituspalo

Tilanteissa, joissa alkusammutus ei onnistu ja automaattista sammutusjärjestelmää ei ole tai se on vikaantunut, palo pääsee kehittymään ja leviämään vapaasti palopakettista toiseen. Palotehon kasvu jatkuu ajan suhteen kiihtyvänä tilan yleissyttymispisteeseen saakka, jolloin palotilan kaikki palava materiaali syttyy palamaan. Palotehopiikin jälkeen hapen puute rajoittaa palotehon suuruutta maksimipalotehon riippuessa palavaan tilaan auki olevien ovien määrästä.

Yleissyttymän jälkeistä suurinta mahdollista happimäärän rajoittamaa palotehoa arvioitiin kaavan (3) avulla, jossa aukkojen keskimääräisenä korkeutena käytettiin 2,7 m. Skenaariotapauksissa, joissa palo-osastointi viereisiin tiloihin onnistuu, happea on saatavilla pelkästään lastaustaskujen kautta, jolloin happirajoitteisen palon paloteho pysyy

laskelmien perusteella vakiona noin 30 MW. Lastaustaskujen lisäksi yhden avoimen osastoivan palo-oven tapauksessa paloteho on puolestaan noin 40 MW. Happirajoitteisena palona varaston palokuorman palamiseen kuluisi useita päiviä, mutta tarvittavien tarkastelujen ja laskentaohjelmiston rajoituksien puitteissa FDS -ohjelmistolla rajoitettiin simuloimaan vain siihen hetkeen saakka, kunnes tilassa tapahtui yleissyttyminen noin yhdeksän minuutin kuluttua palon syttymishetkestä.



Kuva 6.7. Palotehon mukainen rajatilaolosuhde 15 MW palokunnan sammutushyökkäyksen alkaessa (kuvassa ei savua). Vertailun vuoksi myös 60 MW paloteho.

Skenaarioissa, joissa palokunnan sammutustyö onnistui, palokunta pystyi rajoittamaan palon 15 MW suuruuteen edellä mainitun rajatilakriteerin mukaisesti. Sammutustoiminnan aikana paloteho pidettiin sammutushetkestä eteenpäin vakiona ja palokunnan oletettiin rajoittavan palon leviämisen vähintään palo-osaston rajalle (RIL 221 - 2003). Simulointeja jatkettiin 20 minuutin ajan.

6.5.4 Sprinklerijärjestelmän vaikutus

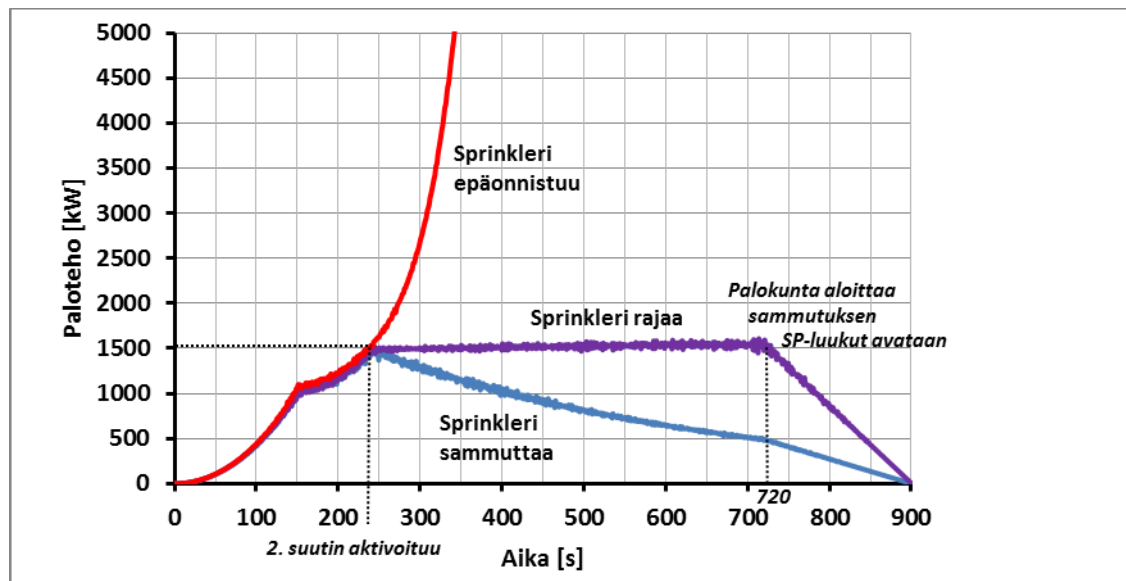
Automaattisen sammutusjärjestelmän toiminta otettiin huomioon tapauksissa, joissa sprinkleri rajaa tai sammuttaa palon. Sprinklereiden mallinnuksessa käytettiin ennalta määritettyjä palotehokäyriä, koska niiden todellista vaikutusta mitoituspalo on vaikeaa mallintaa, eikä tapauksesta ole riittävästi aikaisempaa tietoa. Sprinklereiden rajaamissa ja sammuttavissa tapauksissa palotehon maksimiarvolle asetettiin kriteeriksi toisen suuttimen aktivoituminen, koska varastoon suunniteltavasta sprinklerilaitteistosta ei ollut sen tarkempaa tietoa. Suuttimien aktivoitumisajankohdat selvitettiin alustavien simulaatioiden perusteella, jolloin aktivoitumisen ajanhetkeksi saatiin 240 sekuntia. Maksimipaloteho sprinklerin vaikutuksen alkaessa oli noin 1,5 MW (kuva 6.8).

Sprinklerin rajaamassa palotapauksessa paloteho pysyi aktivoitumishetken jälkeen vakiona, kunnes palokunnan toimintavalmius sammuttaa palo oli saavutettu. Palokunnan sammutuksen ajanhetkenä käytettiin 12 minuuttia, jonka suuruus perustui paloilmoinnin hälytysaikaan, 95 % fraktiilin toimintavalmiusaikaan ja viiden minuutin aikaan tiedustelua sekä letkujen selvittelyä varten.

Skenaariossa SK1B.45 hyödynnettiin RIL 221:n (2003, s. 54) mallia, jossa paloteho laskee eksponentiaalisesti kaavan (24) mukaisesti siihen hetkeen saakka, kunnes palokunnan sammutustoimenpiteet alkavat.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{akt} e^{-\frac{t}{435 s}} \quad (24)$$

Kaavassa paloteho ilmoitetaan [kW] ja t on aika [s] sprinklerin laukeamisen jälkeen. Palon katsotaan sammuneeksi molemmissa sprinklerin sisältävissä skenaarioissa kokonaan ajan hetkellä 900 sekuntia.



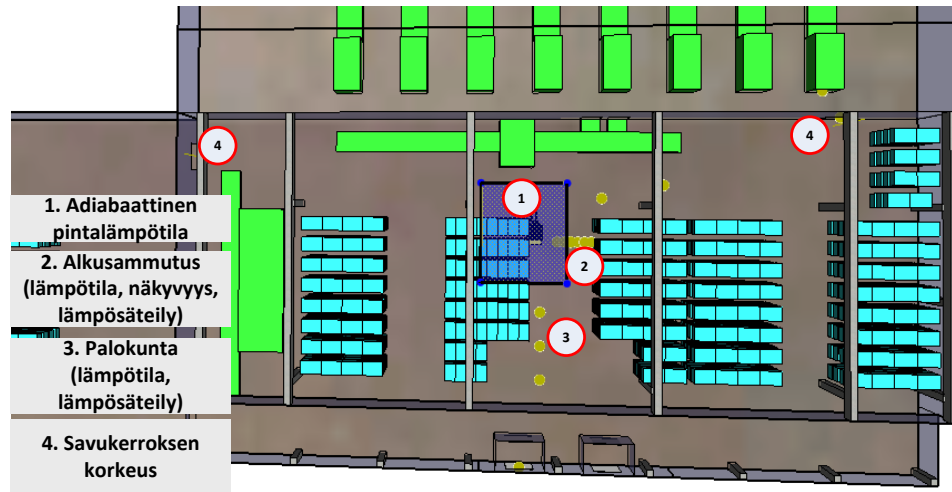
Kuva 6.8. Palotehokäyrät sprinklerin rajaamassa ja sammuttamassa palotapauksessa.

6.6 Mittausparametrit

Mittausparametrien tarkoituksena oli saada tarvittava tieto simulaatioista puuttuviin todennäköisyyksiin ja seurausanalyysiä varten. Alkusammutuksen ja palokunnan sammutustyön olosuhteita mitattiin yksittäisillä lämpösäteily-, näkyvyys ja lämpötilamittareilla, joiden sijaintia on havainnollistettu kuvassa 6.9. Lämmönluovutusnopeuden kehityksen FDS laskee automaattisesti ajan funktiona.

Havaintoaikoihin vaikuttavan paloilmoitinjärjestelmän aktivoitumista arvioitiin sauvilmaisimien avulla visuaalisesti tai mittausdataan pohjautuen. Vastaavat toimenpiteet tehtiin myös sprinklerisuuttimille.

Savukerroksen korkeutta arvioitiin visuaalisesti sekä mittausdatan avulla. Mittauspisteet olivat pakkaamo- ja varaston 2 tiloihin johtavien palo-ovien edustoilla. Varaston kattorakenteiden kestävyyttä arvioitiin mittaamalla suurimpia adiabaattisia pintalämpötiloja (Adiabatic Surface Temperature) $6 \times 7 \text{ m}^2$ kokoiselta alueelta palon yläpuolella. Alueelta mitataan suurimmat pintalämpötilat ajan funktiona.



Kuva 6.9. *Palosimulaatiomallin mittauspisteitä.*

Lisäksi yleisesti oltiin kiinnostuneita tilan lämpötilan kehityksestä ja ilmavirtauksista, joita mitattiin koko tilan kattavissa lämpötila- ja virtausleikkauksina koordinaattien suunnissa. Samalla pystyttiin havaitsemaan mahdollisia mallinnusvirheitä ja epäkohtia.

7 SEURAUSTEN ARVIOINTI

7.1 Arviointijako

Tarkasteluissa seuraukset jaettiin ryhmiin niiden tilojen mukaan, joihin ne kohdistuvat:

- ❖ Tuotevarasto (TV)
- ❖ Pakkaamotila (P)
- ❖ Varasto 2 (V)
- ❖ Ympäristövahingot (Y)

Eri seurauksista aiheutuvat kustannukset määritettiin yhteistyössä tilaajan edustajien kanssa. Taloudellisia lukuja ei tässä työssä esitetä, vaan tarkasteluissa keskitytään kulu-
jen kohdentamisen periaatteisiin.

7.2 Seurauskustannukset

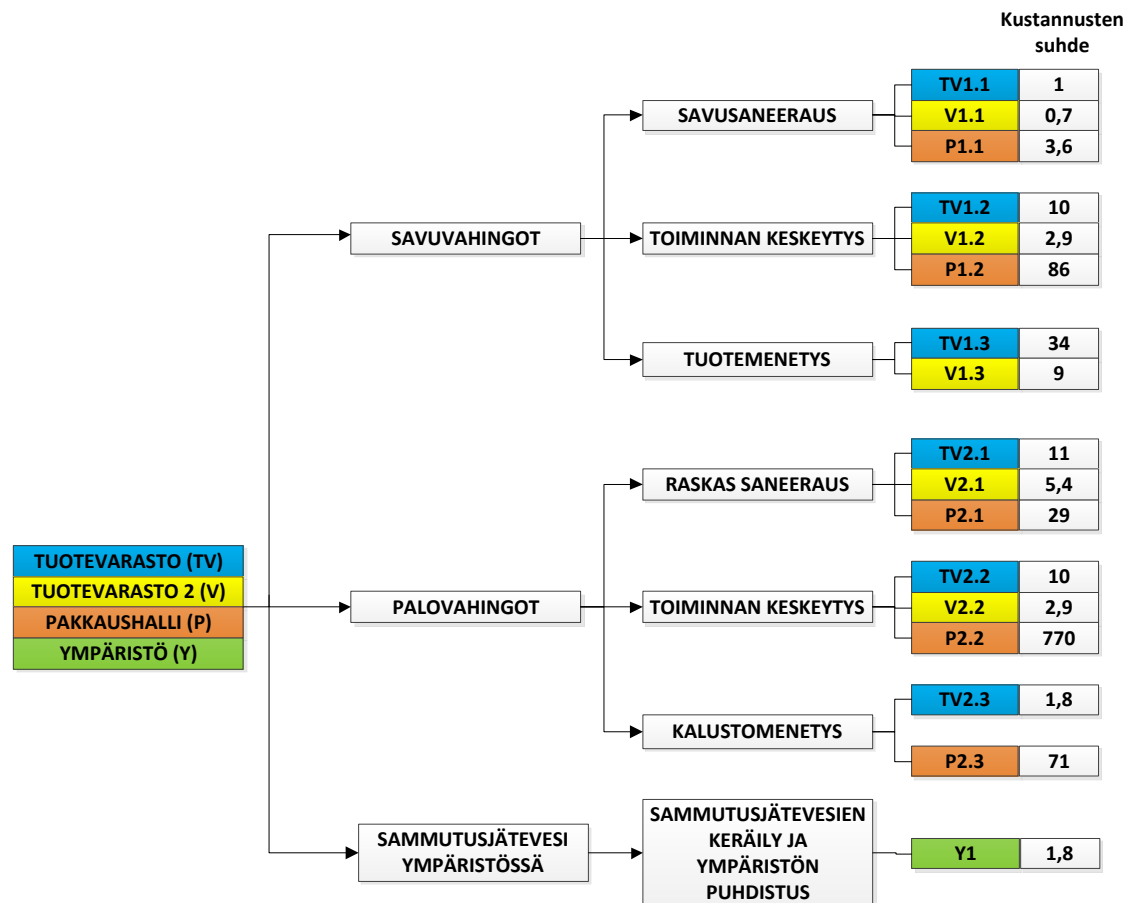
Yksittäiseen tilaan kohdistuvia vaurioita arvioitiin palon, savun ja sammutusjäteveden leviämisen kannalta kuvassa 7.1 esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Seurauskustannuksia oli 17 kpl, joiden toteutuvuutta tutkittiin skenaariokohtaisesti. Tilakohtaisten kustannusten keskinäistä suuruutta on havainnollistettu suhdeluvuilla, joissa verrannollisuusarvona 1 on tuotevaraston savusaneerauskustannus (TV1.1).

Rakennuksen tiloihin kohdistuvista kustannuksista suurimmat tulevat palon tuottamista vaurioista savun ja sammutusjäteveden vaurioiden ollessa vähäisempiä. Palon aiheuttamien rasisusten seurauksena korjaustoimenpiteiksi arvioitiin tilan raskas saneeraus, kaluston uusiminen sekä näistä aiheutuva toiminnan keskeytyminen. Raskas saneerauksen kustannus katsottiin esimerkiksi toteutuvaksi, kun kantavien rakenteiden, kuten ontelolaattarakenteisen yläpohjan, kantavuus vaarantui. Saneerauksen kustannusta arvioitiin uudisrakennushinnan perusteella.

Palon rakenteellisten vaurioiden tapauksessa sekä muissa saneerauksissa työn kesto määritti suoraan toiminnan keskeytykseen kuluva ajan ja edelleen siitä aiheutuvat kustannukset. Arviot keskeytyskustannuksista perustuivat tilaajaan omiin laskelmiin. Kuvasta 7.1 nähdään, että palovahingot ja varsinkin toiminnan keskeytys aiheuttavat ylivoimaisesti suurimmat kustannukset, jos sellaisia syntyy tarkasteltavissa skenaarioissa. Raskaiden saneerausten sattuessa pidempiaikainen tuotantolinjan keskeytyminen näkyisi heti merkittävinä taloudellisina tappioina. Pakkaamotiloihin kohdistuu yleisesti ottaenkin varastoja suurempi kustannusvaikutus, koska pakkaamotilat sisältävät arvokasta kalustoa, se on tilana isoin ja saneeraustyön sattuessa koko tehdastoiminta keskeytyy.

Saneerauksen kohdistuessa pelkästään varastoihin valmiit tuotteet voidaan kuljettaa väliaikaisesti lähivarastoihin, jolloin keskeytysaika on huomattavasti lyhyempi.

Palovahinkoa vähäisempiä kustannuksia aiheuttavat savuvahingot, joiden seurauksiksi luokiteltiin savuvahinkojen saneeraus, tuotteiden menetys ja savuvahinkojen korjauksesta aiheutuva toiminnan keskeytyminen. Savusaneeraus käsittää savu- ja hajuhaittojen korjauksen, joiden rahallinen suuruus arvioitiin neliöhintaperusteisesti savuvahinkohaittojen korjaukseen erikoistuneiden yritysten antamien tietojen pohjalta. Savuvahinkojen sattuessa kalustoa ja kantavia rakenteita ei tarvitse saneerata.



Kuva 7.1. Tilakohtaiset kustannukset vaurioluokittain.

Tilojen ulkopuolelle leviävä sammutusjätevesi aiheuttaa ympäristövahingon. Sammutusjätevesi koostuu sammutuslaitteiston tai palokunnan sammutusvedestä sekä kemikaaleista, jotka kulkeutuvat sammutusaineeseen tai muodostuvat paloreaktion yhteydessä. Rakennuksen lähetyvillä ei ole pohjavesialueita, eikä myöskään vesistöjä, joten laajemman ympäristökatastrofin uhka on vähäinen. Ympäristövahinkoa koskevat kustannukset aiheutuvatkin lähinnä maansiirto- ja puhdistustöistä sekä sammutusjätevesien keräilystä, jotka ovat tarpeen ehostettaessa piha-aluetta ja lähiympäristöä.

7.3 Seurausluokitusten yhdistämiskriteerit

Savuvahinkojen aiheuttamat saneeraukset olivat palovahinkojen saneerauksiin verrattuna toisensa poissulkevat. Palovahinkojen sattuessa savuvahinkojen saneeraukset ja keskeytyskustannukset laskettiin kuuluvaksi raskaan saneerauksen kustannusten piiriin eli saneerauskustannukset eivät voineet tapahtua skenaariossa samaan aikaan.

Tilojen sisäisen sammutusjäteveden leviäminen aiheuttaa saneeraus- ja puhdistuskustannuksia. Nesteiden leviämisestä syntyvät kustannukset ovat kuitenkin hyvin minimaalaisia verrattuna muihin kustannuseriin, jolloin niiden katsottiin kuuluvaksi savu-/palosaneerausten piiriin. Lisäksi seurausluokituksissa rajauduttiin vain vakavimpiin seurauksiin, joten odotettavissa olevat pienemmät kustannuserät laskettiin kuuluvaksi edellä mainittuihin kolmeen pääryhmään.

8 PALOSIMULOINTIEN TULOKSET

8.1 Alkusammutuksen onnistumisen todennäköisyys

Simulointien perusteella alkusammutuksen rajatilaolosuhteet saavutettiin lämpösäteilykriteerin ylittäessä sallitun arvon ($1,5 \text{ kW/m}^2$) 130 sekunnin kuluttua palon syttymishetkestä. Suurimmaksi mahdolliseksi havaintoajaksi tilan henkilöille saatiin 70 sekuntia, kun rajahetkestä vähennettiin alkusammutuksen valmisteluun kuluva aika 60 sekuntia. Henkilöiden ollessa tilan ulkopuolella alkusammutuksen havainnointiin oli käytössä ainoastaan 10 sekuntia, kun alkusammutuksen valmistelun kestoksi arvioitiin 120 sekuntia.

8.1.1 Paloilmoitinjärjestelmä onnistuu

Paloilmoitinjärjestelmän onnistuessa kuvan 5.3 havainnointiajan kertymäkuvaajasta 70 sekunnin havainnointiaika vastasi 28 % epäonnistumisen todennäköisyyttä, kun varastohenkilökunta aloitti sammutustoimenpiteet. Ulkopuolisille henkilöille epäonnistumisen todennäköisyys oli 98 %. Lopulliseksi alkusammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydeksi kuvan 5.2 vikapuusta saatiin 75 %.

8.1.2 Paloilmoitinjärjestelmä epäonnistuu

Vastaavasti paloilmoitinjärjestelmän epäonnistuessa kuvan 5.4 havainnointiajan kertymäkuvaajasta 70 sekunnin havainnointiaika vastasi 48 % epäonnistumisen todennäköisyyttä, kun varastohenkilökunta aloitti sammutustoimenpiteet. Ulkopuolisille henkilöille epäonnistumisen todennäköisyys oli 99 %. Alkusammutuksen epäonnistumisen kokonaistodennäköisyys oli 82 %.

8.2 Palokunnan sammutustyön onnistumisen todennäköisyys

Palokunnan sammutustyön kriittinen ajankohta saavutettiin 6,8 minuutin kuluttua palon syttymishetkestä, jolloin paloteho ylitti rajatilaolosuhteet (15 MW).

8.2.1 Paloilmoitinjärjestelmä onnistuu

Paloilmoittimen toimiessa toimintavalmiusajan tuli olla 1,3 minuuttia, jotta sammutustyö aloitettiin ennen rajatilaolosuhteita, kun havainnointiin ja paikan päällä selvittelyyn sekä tiedusteluun kului aikaa 5,5 minuuttia. Toimintavalmiusajan kuvaajan perusteella (kuva 5.8) palokunnan sammutustyö epäonnistui 78 % todennäköisyydellä.

8.2.2 Paloilmoitinjärjestelmä epäonnistuu

Viallinen paloilmoitinjärjestelmä pidensi havainnointiaikaa siten, että palokunnalla ei ollut toimintaedellytyksiä tehdä onnistunutta sammutushyökkäystä missään tilanteessa ennen rajatilaolosuhteita. Epäonnistumisen todennäköisyys oli siten **100 %**.

8.3 Seuraukset

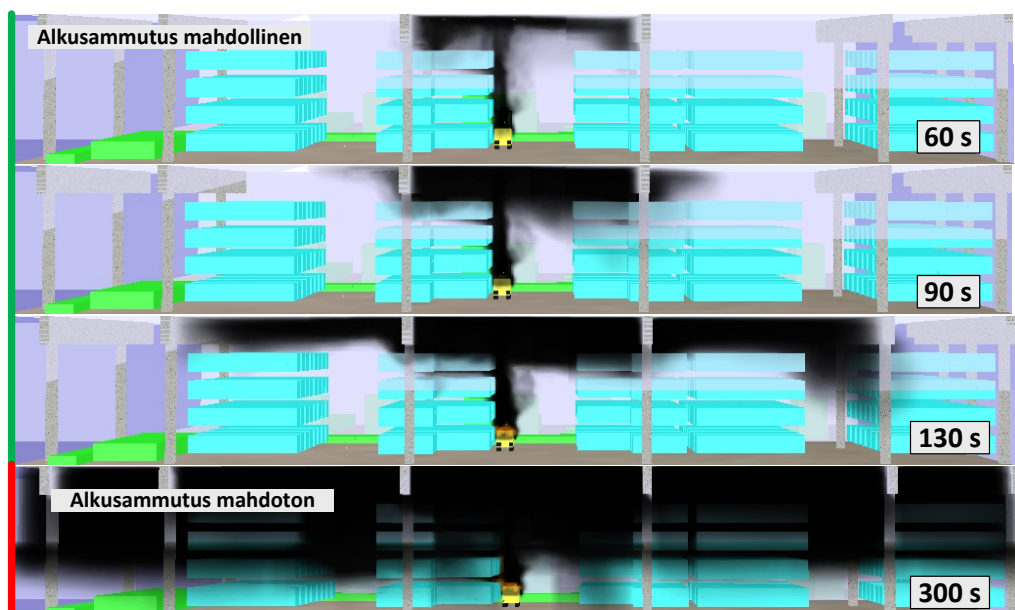
Palosimulointien seuraustarkastelut painoutuivat savu- ja palovahinkoihin. Ympäristölle aiheutuneita vahinkoja ei sellaisenaan pystytty simuloinneista mittaamaan, joten niiden vakavuutta arvioitiin käsin laskennan kautta.

8.3.1 Savuvahingot

Savuvahinkojen suuruutta arvioitiin savukerroskorkeusmittareiden sekä visuaalisten havaintojen perusteella. Savukerroksen korkeutta rekisteröiviä mittauspisteitä oli kaksi, jotka sijaitsivat varaston 2 ja pakkaamotilaan johtavien palo-ovien edustoilla.

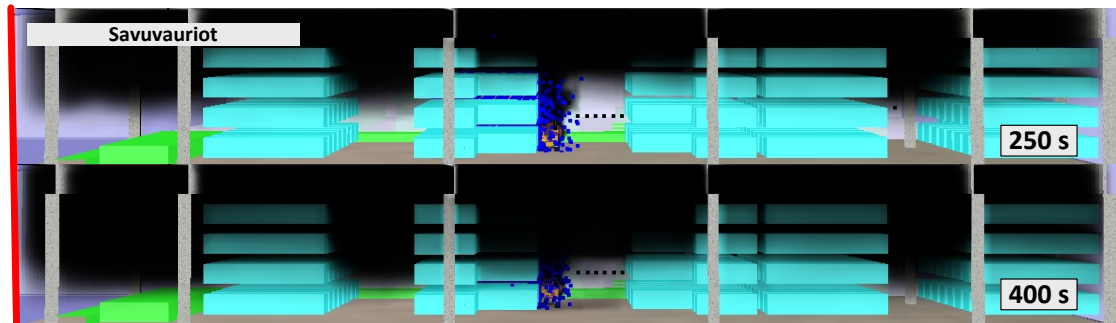
Tuotevarasto:

Alkusammutustoiminnan kannalta kriittiset olosuhteet saavutettiin 130 sekunnin kuluttua palon syttymishetkestä. Kuvasta 8.1 nähdään, että jo ennen alkusammutuksen kriittisiä olosuhteita savu on levinnyt sillä tavoin, että osa katon läheisyydessä olevista tuotelavoista joudutaan hylkäämään. Menetyksen suuruudeksi arvioitiin 50 % kaikkien lavojen arvosta. Tilan muut savuvahingot alkusammutuksen onnistuessa sen sijaan saadaan korjattua tuulettamalla ja vähäisin toimenpitein, jolloin kustannusvaikutusta ei otettu huomioon.



Kuva 8.1. Savun leviäminen tuotevarastossa ajanhetkillä 60, 90, 130 ja 300 sekuntia (SK1B.7).

Alkusammutuksen epäonnistuessa savusaneeraus tuotevarastossa on tarpeellinen kaikissa tapauksissa sprinklerin toiminnasta riippumatta, kuten kuvasta 8.2 on havaittavissa. Myöskään palokunta ei ehdi ajoissa paikalle ($t = 410$ s) tekemään sammutus-hyökkäystä tai avaamaan savunpoistoluukkuja savuvaurioiden välttämiseksi. Samalla menetetään varaston kaikki tuotteet.



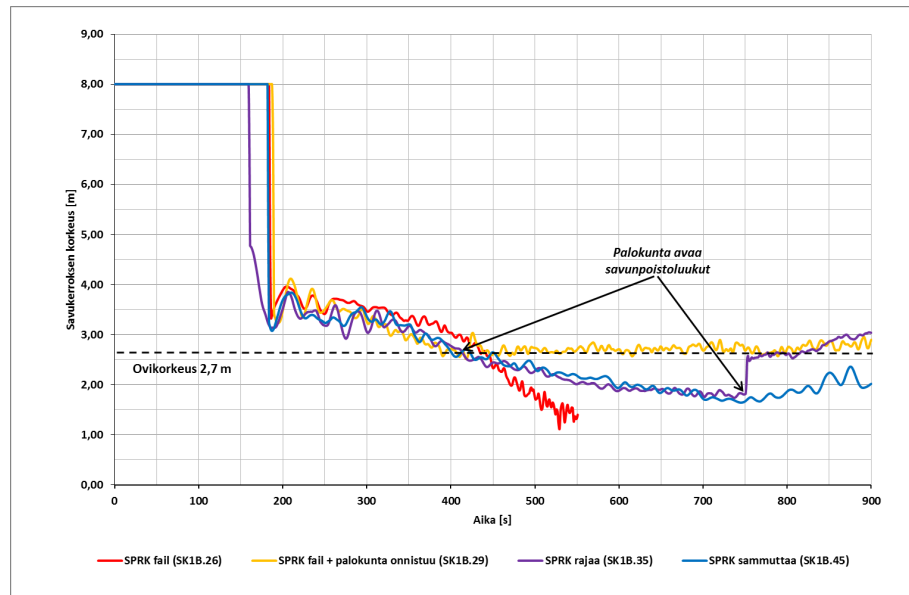
Kuva 8.2. Savu tuotevarastossa sprinklerin sammuttaessa paloa 250 ja 400 sekuntia (SK1B.45).

Viereiset tilat:

Kuvissa 8.3 ja 8.4 on esitetty savukerroksen alapinnan etäisyys lattiatasosta pakkaamotilaan ja varastoon 2 johtavien palo-ovien edustoilla. Simuloiduissa skenaarioissa savukerroksen korkeus laski tuotantotilan mittauspisteessä äkillisesti noin 180 sekunnin kohdalla. Suuren hyppäyksen aiheuttivat kattoa kannattelevat teräsbetonipalkit, jotka toimivat aluksi savusulkuverhon tavoin estäen tehokkaasti savun leviämisen ulompiin nurkkiin. Varaston 2 mittauspisteessä savukerroksen äkillinen korkeuden muutos tapahtui myöhemmin (~ 230 s) johtuen mittauspisteen ulommasta sijainnista syttymiskohtaan nähden. Sprinklerin vaikuttaessa savunmuodostus ei ollut yhtä voimakasta kuin suojaamattomassa palossa, mutta pisaroiden sitoessa lämpöä kuumassa savukerroksessa savun laskeutuminen oli nopeampaa verrattuna sprinklaamattomaan tapaukseen.

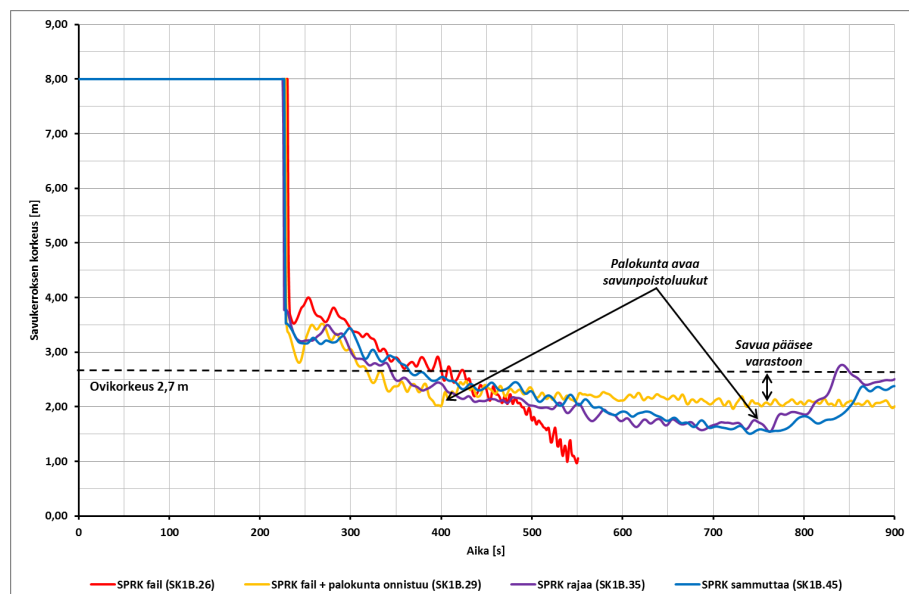
Viereisten tilojen osalta savuvahinkojen katsottiin syntyvän, kun savukerros laskeutui avoimen oviaukon tason alapuolelle korkeuden ollessa 2,7 m. Kuvan 8.3 perusteella savukerros saavutti kriittisen korkeuden kaikissa skenaarioissa 400 - 450 sekunnin välillä. Varasto 2:n edustalla kriittinen korkeus saavutettiin hieman aiemmin, 350 - 400 sekunnissa.

Savunpoiston toiminnalla oli merkittävä rooli, kun tarkasteltiin savun leviämistä viereisiin tiloihin. Palokunnan toiminnan kriittinen ajan hetki (410 s) on juuri samoihin aikoihin kuin savun laskeutuminen alle ovikorkeuden. Skenaarion SK1B.29 kuvaajista nähdään (kuva 8.3), että savunpoistoluukkujen oikea-aikaisella avauksella savukerroksen korkeus saatiin pakkaamotilojen osalta ylläpidettyä riittävän korkealla tasolla, jotta savu ei päässyt leviämään viereiseen tilaan. Pakkaamotilaan johtavan oven edustalla savunpoisto toimii suunnitellusti, koska savunpoistoluukut sijaitsevat aivan oven lähettyvillä. Jos savunpoistoluukkuja ei avata ajoissa, pakkaamotila kärsii savuvahingoista.

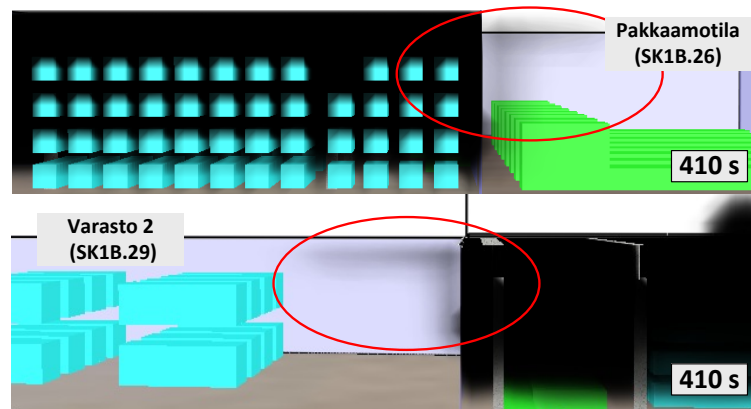


Kuva 8.3. Savukerroksen alapinnan etäisyys lattiasta pakkaamotilaan johtavan palo-oven edustalla.

Varaston 2 edustalla savukorkeus pysytteli hieman yli kahdessa metrissä avattaessa savunpoistoluukut. Savua kulkeutui siis viereiseen varastoon, koska tuotevaraston savunpoistoluukut sijaitsivat sen verran etäällä avoimesta ovesta, että niiden kapasiteetti ei riittänyt ylläpitämään riittävää vapaan savun korkeutta. Savuvahinkojen ei kuitenkaan katsottu syntyvän palokunnan onnistuneen toiminnan skenaariossa, koska varastossa 2 ja pakkaamotiloissa ovat myös samaan aikaan avattavat savunpoistoluukut, jolloin savua ei ehdi kertyä viereisiin tiloihin haitallisia määriä. Myöskään ennen palokunnan toiminnan rajahetkeä (kuva 8.5) savun kertymä viereisissä tiloissa oli sen verran merkityksetöntä, että kustannusvaikutusta ei otettu huomioon.

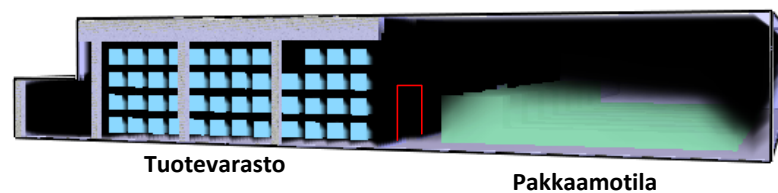


Kuva 8.4. Savukerroksen alapinnan etäisyys lattiasta varastoon 2 johtavan palo-oven edustalla.

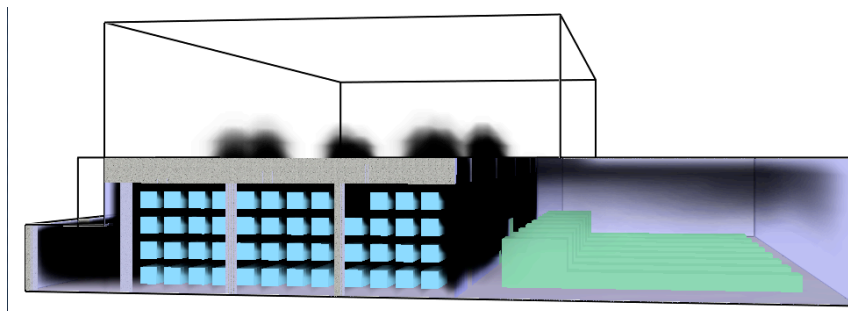


Kuva 8.5. Pakkaamotilan ja varaston 2 vähäiset savuvahingot, kun palokunta avaa savunpoistoluukut ajanhetkellä 410 sekuntia.

Palokunnan kriittisen toiminnan ajanhetken jälkeen viereiset tilat kokevat simulaatioissa aina savuvahinkoja, kun palo-osastoinnissa tapahtuu epäonnistuminen. Kuvissa 8.6 ja 8.7 on havainnollistettu tuotantotilassa olevan savun määrää palon yleissyttymishetkellä (SK1B.26) ja sprinklerin rajaamassa palotapauksessa (SK1B.35), kun palokunta saapuu paikalle vasta 750 sekunnin kuluttua palon syttymishetkestä (95 % -fraktiili).



Kuva 8.6. Savun leviäminen pakkaamotilaan hetkellä, jolloin tapahtuu yleissyttyminen (SK1B.26)



Kuva 8.7. Sprinklerin rajaaman palotapauksen (SK1B.35) savuvahingot pakkaamotiloissa, kun palokunta saapuu paikalle ja avaa savunpoistoluukut ($t = 750$ s)

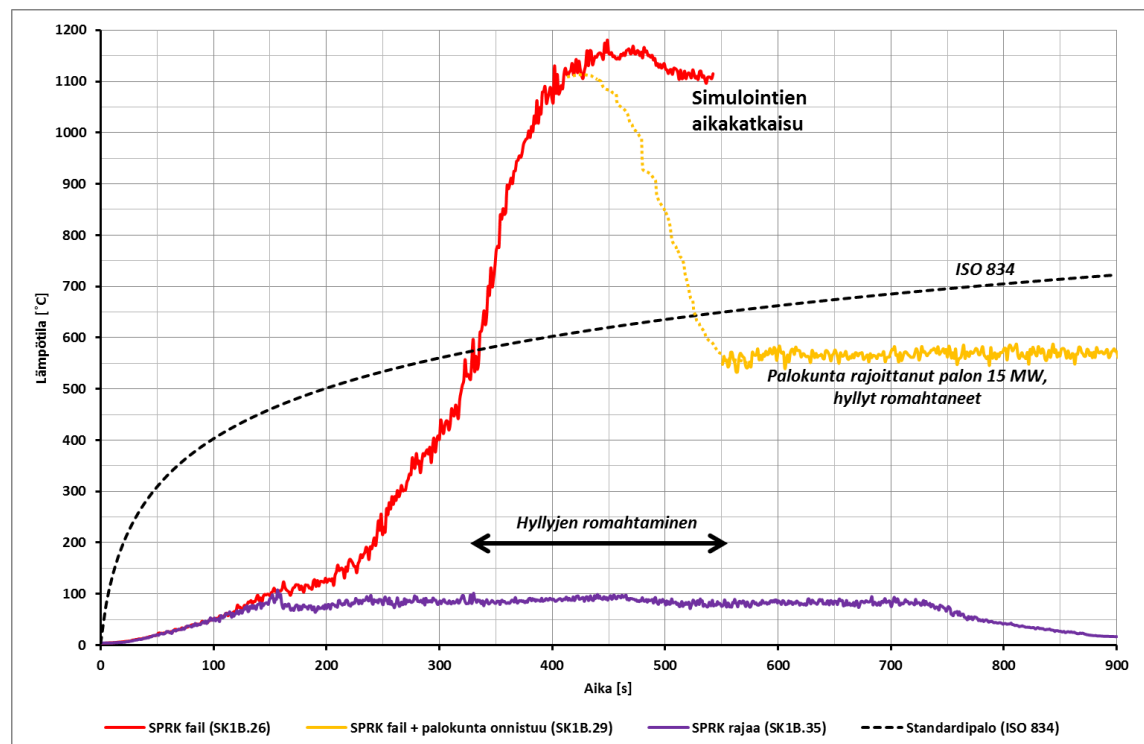
Yhteenvetona savuvahingoista todetaan, että viereiset tilat kokivat savuvahinkoja niissä tapauksissa, joissa palo-osastointi epäonnistui ja palokunnan kriittinen toiminta-aika ylitettiin. Jos palokunta onnistui tai palo-osastointi toimi, savuvahinkojen seuraukset rajoittuivat pelkästään tuotevarastoon.

8.3.2 Palovahingot

Rakenteellisia vaurioita aiheuttavia palovahinkoja syntyi skenaarioissa, joissa sprinkleri epäonnistui. Tutkimuksen puitteissa ei laskettu rakenteiden palonkestoa, koska tarkastelun tarkoituksena oli perehtyä riskianalyysiin. Lisäksi jännitettyjen betonirakenteiden laskennalliset tarkastelut palotilanteessa ovat monimutkaisia, joten arviot rakenteiden kestävyyksistä mitoituspalon mukaisessa lämpörasituksessa perustuivat mitattuihin rakenteiden pintalämpötiloihin ja palokunnan kykyyn toimia palotilanteessa.

Tuotevarasto:

Tuotevarastoon kohdistuvia palovahinkoja arvioitiin pintaan kohdistuvien lämpörasitusten perusteella. Kaikkein ankarimman palorasituksen oletettiin kohdistuvan yläpohjaan ja kattokannattajiin, joten palon syttymispisteen yläpuolelta $6 \times 7 \text{ m}^2$ kokoiselta kattorakenteen osalta mitattiin rakenteeseen kohdistuva korkein adiabaattinen pintalämpötila ajan funktiona (kuva 8.8). Sprinklerin rajaamassa tapauksessa pintalämpötilat pysyttelivät kaiken aikaa alle 100 °C , jolloin rakenteisiin ei kohdistunut missään olosuhteissa sellaisia lämpörasituksia, jotka olisivat voineet vaarantaa rakenteellista kantavuutta.



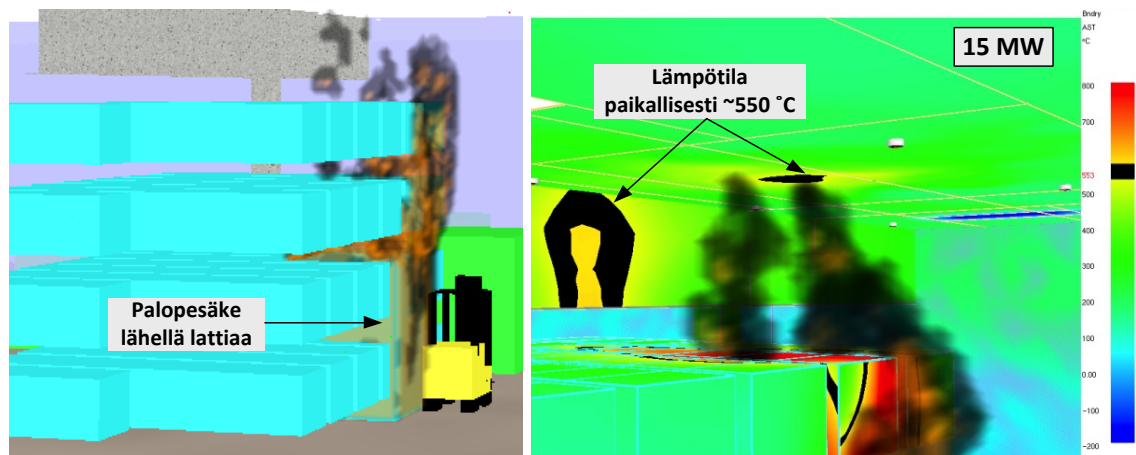
Kuva 8.8. Kattorakenteen maksimi adiabaattinen pintalämpötila $6 \times 7 \text{ m}^2$ kokoiselta alueelta palon yläpuolella.

Sprinklerin epäonnistuessa tuotevaraston kattorakenteet altistuivat hyvin pian liekkikosketukseen korkean varastointitavan myötä. Tällöin pintalämpötilat kohosivat paikallisesti vajaassa seitsemässä minuutissa yli 1000 °C lämpötiloihin, joka on kuvassa 8.8 esitettyä standardipalokäyrän mukaista mitoitustlämpöä huomattavasti suurempi lämpöaltistus. Palokunnan epäonnistuneen sammutushyökkäyksen sattuessa palo kehiti-

tyi vain muutamassa minuutissa paloteholtaan vielä tästäkin monikertaiseksi, jolloin sammutusolosuhteiden puolesta ei ole enää muita mahdollisuuksia kuin poistua tilasta ja yrittää rajoittaa palon leviämistä varaston ulkopuolella.

Yleissyttymän jälkeisiä olosuhteita ei tarkastelujen yhteydessä mallinnettu, mutta lämpötilat pysyttelevät todennäköisesti pitkään yli 800 °C lukemissa, vaikka hyllyt romahtaisivatkin, koska palokuormaa on paljon, eikä sen palamista rajoita muu kuin happi. Yläpohjarakenteelle on asetettu 120 minuutin palonkestovaatimus (REI 120), mutta standardipaloa suuremmalla lämpörasituksella kahden tunnin palonkesto on kyseenalainen. Lisäksi palokunnan osalta hallitsemattomaan tilaan päässeen palon hallintaan saaminen kestää vähintään useita tunteja. Täten oletetaan, että paikallisesti yläpuoliset rakenteet voivat romahtaa tai kokea vähintäänkin mittavia rakenteellisia vaurioita, sillä kovassa lämpörasituksessa teräsbetonirakenteen yhteisvaikutus menetetään ja terästen lujuus heikkenee. Jännitettyjen betonirakenteiden romahduksesta palossa on myös aikaisempaa kokemusta, jolloin varastohyllystä alkunsa saaneen palon seurauksena ontelolaattarakenteinen väli- ja yläpohja sortuivat sammutustöiden kestäessä useita päiviä. (Lehtinen 2011) Tästä syystä kantavien rakenteiden ja koko tilan raskaiden saneerausten oletettiin olevan tarpeen, kun palokunta epäonnistuu.

Palokunnan onnistuneen sammutushyökkäyksen maksimipalotehoksi rajattiin 15 MW. Rajatilaolosuhteissa lämpötila on oletettavasti ehtinyt kohota katon liekkikosketuksen myötä paikallisesti yli 1000 °C lämpötiloihin. Lämpötilaa voidaan kuitenkin pitää vain hetkellisenä, sillä onnistuneella palokunnan toiminnalla suurimmat liekit katon läheisyydessä saadaan taltutettua ja todennäköisesti hyllystöt romahtavat tässä kuumuudesta, jolloin palopesäke rajautuu lähemmäs lattiaa ja hyllystöjen sisäosiin. Tilanne on kuvan 8.9 mukainen vasemman puoleinen tilanne. Oikealla on kuvattu kattorakenteen adiabaattisia pintalämpötiloja samassa tilanteessa, kun palo pysytteli 15 MW tasolla. Liekkikosketuksen kadottua kattorakenteen pintalämpötilat tasautuivat noin 550 °C tienoille, kunnes palo saadaan lopullisesti hallintaan.



Kuva 8.9. Palon rajautuminen kuormahyllykön sisäosiin palokunnan toimiessa (SK1B.29).

Puhtaalle teräkselle kriittinen lämpötila on yleensä noin 500 °C. Betoniin suojattuna teräksen lämpeneminen hidastuu entisestään palonkeston riippuessa mm. poikkileikkauksen dimensioista ja betonipeitteen paksuudesta. Jännitettyihin teräsbetonirakenteisiin kohdistuvan lämpöaltistuksen ei tässä tilanteessa arvioitu olevan vielä kriittinen varsinakaan, kun lämpötilat pysyttelivät lämpötilahuipun jälkeen standardipalokäyrän alapuolella. Simuloinneissa ei ole myöskään otettu huomioon palokunnan kykyä tarvittaessa viilentää lämpöaltistettuja pintoja vedellä, mutta uhkana silloin on betonirakenteen räjähdysmäinen lohkeilu äkillisen lämpötilanmuutoksen seurauksena. Tässä tapauksessa palokunnan onnistuessa tuotevaraston arvioitiin kuitenkin kärsivän vain savuvaurioista.

Viereiset tilat:

Viereisissä tiloissa palovahinkojen uhka arvioitiin konkreettiseksi, kun palokunnan sammutushyökkäys epäonnistui. Palo-osastoinnin onnistuessa viereiset tilat säästyvät raskailta saneerauksilta, koska palo-osastoivien seinien (EI 120 ja EI-M 90) oletettiin kestävän niille asetetun vähimmäisajan. Palonkeston täyttymistä ei tässä yhteydessä tutkittu tarkemmin, koska monikerroksisten seinärakenteiden lämpökäyttämisen laskeminen on verrattain monimutkaista kokonaisriskitarkastelua ajatellen. Lisäksi palokunta pystyy joiltakin osin viilentämään seiniä viereisen varaston ja pakkaamotilojen puolelta parantaen osastoinnin pitävyyttä, mutta savuvahingot ovat väistämättömät useamman tunnin mittaisessa palossa.

Katastrofaalisin tapaus esiintyi silloin, kun sprinkleri, palokunta ja palo-osastointi epäonnistuivat. Pahimman skenaarion mukaan varasto palaisi useita päiviä. Viallinen palo-osastointi edesauttaa palon leviämistä viereisiin tiloihin hyvin nopeasti, sillä esimerkiksi pakkaamotilaan johtavan palo-oven edustalla lämpötilat kohosivat ennen lieskahdushetkeä noin 300 °C tuntumaan ja lämpösäteily yli 5 kW/m². Näissä olosuhteissa palokunta ei pysty enää toimimaan, joten palon leviäminen viereisiin tiloihin katsottiin olevan realistista. Palon levitessä viereisiin tiloihin raskaasta saneerauksesta ja toiminnan keskeytymisestä aiheutuvat kustannukset ovat mittavat.

Yhteenvedona palovahingoista todetaan, että raskas saneeraus oli tuotevarastossa tarpeen, kun palokunnan sammutushyökkäys epäonnistui. Viereisissä tiloissa raskasta saneerausta tarvittiin, kun palokunnan sammutuksen lisäksi palo-osastointi epäonnistui. Onnistunut palokunnan sammutushyökkäys rajasi vahingot pelkästään savuvahingoiksi.

8.3.3 Ympäristövahingot

Ympäristövahinkoja ei palosimulointien avulla pystytty mittaamaan, joten skenaariokohtaisia seurauksia arvioitiin laskennallisesti sprinklereiden ja palokunnan käyttämän vesivuon mukaan. Tässä tapauksessa rajoituttiin pelkästään puhtaaseen veteen sammutusaineena, jolloin esimerkiksi vaahto-vesi sekoituksia ei tarkasteltu.

Sprinkleri rajaa tai sammuttaa palon:

Palon rajautuessa tai sammuesssa sammutusjätevesi muodostui sprinklerin ja palokunnan käyttämästä vesimäärästä. Varaston geometrian perusteella tila laskettiin kuuluvaksi raskaaseen sprinkleriluokkaan, jolloin sprinklerisäännöt (CEA 4001) määräävät sprinklereiden vesivuoksi 15 mm/min. Sprinklerin rajaamassa palotapauksessa laukesi kolme telneistösprinkleriä, mutta laskelmia varten tehtiin varmalla puolella oleva oletus yhden kattosprinklerin (suojausala on 9 m²) laukeamisesta telneistösprinklereiden lisäksi. Lauenneiden sprinklereiden yhteenlasketuksi kokonaisvesivuoksi saatiin 270 l/min.

Sprinklereiden purkaman vesimäärän kannalta mitoitettavien tapaus esiintyi paloilmoittimien epäonnistuksessa, jolloin palokunta oli toimintavalmiudessa 95 % todennäköisyydellä noin 15 minuutissa. Tästä ajasta sprinklereiden vaikutusaika on 13 minuuttia, kun aktivoitumiseen kului aikaa hieman yli 2 minuuttia, Kyseisessä ajassa lauenneet sprinklerit ehtivät suihkuttaa vettä noin 3,5 m³.

Palokunnan käyttämää vesimäärää arvioitiin VTT:n tekemän tutkimuksen ”Sammutusjätevedet ja ympäristö” perusteella. (Paloposki 2005). Taulukossa 8.1 on arvioitu palokunnan sammuttamiseen tarvittavaa aikaa, sammutusvesivirtaa, -vuota ja -määrää pinta-alan funktiona. Osa sammutusvedestä höyrystyy palon tuottaman kuumuuden vuoksi ja osa imeytyy palokohteen irtaimistoon ja rakennukseen. Aineiston perusteella sammutusjäteveden määräksi arvioitiin puolet sammutusveden määrästä. Kun sprinklerit rajaavat palon enintään 9 m² alueelle, sammutusjätevettä muodostuisi noin 7 m³. Kirjoittajan mukaan pienille paloille määritetyt arvot ovat hyvin konservatiivisia, sillä 1,5 MW palon sammuttamiseen ei tarvita tunnin sammutusaikaa tai vesimäärää, johon tarvittaisiin erillinen palokunnan säiliöauto. Tästä syystä sammutusjäteveden määrä puolitettiin arvoon 3,5 m³.

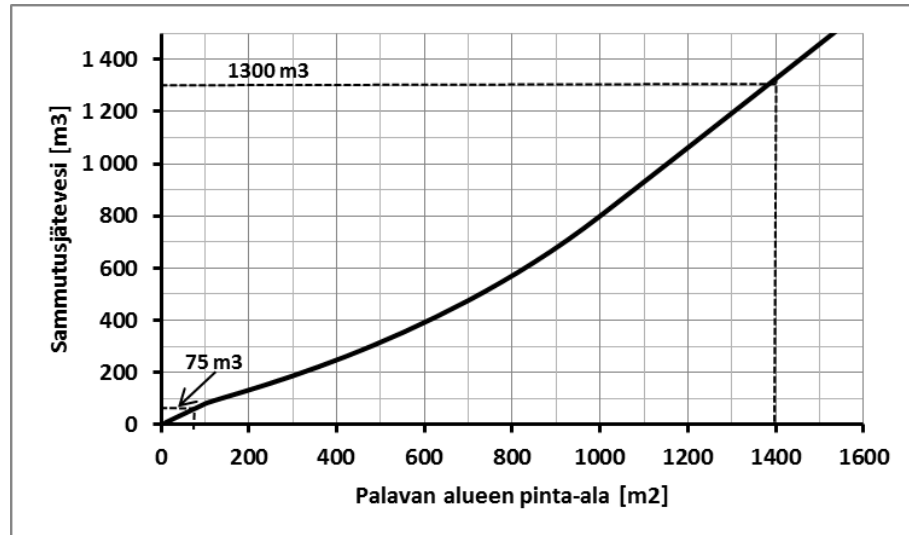
Taulukko 8.1. Tulipalon sammuttamiseen tarvittava aika, sammutusvesivirta, sammutusvesivuo ja sammutusvesimäärä palavan alueen pinta-alan funktiona. (Paloposki 2005, s.48).

<i>Palavan alueen pinta-ala</i> [m ²]	<i>Sammuttamiseen tarvittava aika</i> [h]	<i>Sammutus- vesivirta</i> [m ³ /min]	<i>Sammutus- vesivuo</i> [l/min/m ²]	<i>Sammutus- vesimäärä</i> [m ³]	<i>Sammutus- jätevesimäärä</i> [m ³]
10	1	0,3	30	15	8
100	3	1	10	150	80
1000	10	3	3	1500	800
10000	40	40	1	25000	13000

Kokonaissammutusjätevesimääräksi saatiin 7 m³, mikä vastaa noin puolen senttimetrin nestekerrosta tuotevaraston lattialla. Kyseinen vesimäärä valuisi suurimmilta osiin viemäriin aiheuttaen korkeintaan pieniä siivouskustannuksia. Kriteerit ympäristövahingoille eivät näin ollen täyttyneet.

Sprinkleri viallinen + palokunta onnistuu:

Palokunnan sammutusjäteveden määrää arvioitiin kuvasta 8.10 perustuen edellä esitettyihin VTT:n taulukon tietoihin. Taulukon arvojen oletettiin käyttäytyvän lineaarisesti annetuilla väleillä. Palosimulaatioiden perusteella oletettiin, että palokunnan sammutuksen onnistuessa palon pinta-ala oli enintään yhden varastolohkon suuruinen eli noin 75 m^2 . Sammutusjätevettä syntyy kuvaajan perusteella noin 75 m^3 .



Kuva 8.10. Sammutusjäteveden määrä palavan alueen pinta-alan funktiona.

Kyseinen sammutusjätevesimäärä ei aiheuta vielä järin suurta ympäristövahinkoa varsinkaan, kun vesistöjä ei ole aivan lähettyvillä. Piha-alueen kunnostusta, viemäriverkon puhdistusta ym. pienekköjä toimenpiteitä on kuitenkin odotettavissa, joten kustannusvaikutukseksi arvioitiin 20 % täyden ympäristövahingon kustannuksista.

Sprinkleri viallinen + palokunta epäonnistuu:

Palokunnan epäonnistuminen johtaa varastotilan tai pahimmissa tapauksessa myös viereisten tilojen palamiseen, jolloin sammutusjäteveden kertyminen oli aivan eri luokkaa. Palon rajautuessa tuotevarastoon (1400 m^2) sammutusjätevettä syntyy kuvaajan perusteella 1300 m^3 . Palon laajetessa myös viereisiin tiloihin palavan alueen pinta-ala on noin 5000 m^2 . Kokonaisjäteveden määrä pahimmissa tapauksessa olisi noin 6000 m^3 .

Palokunnan epäonnistuessa sammutusjätevesimäärä leviäisi väistämättä rakennuksen ulkopuolelle, koska 1300 m^3 vastaa tilavuudeltaan noin 40 täysperävaunullista vettä. Pahimmissa skenaariossa sammutusjätevesimäärä on vielä tästäkin nelinkertainen. Kyseiset nestemäärät ovat jo sen verran mittavia, että palokunnan toimintakapasiteetti voi ennemmin tulla mitoittavaksi tekijäksi. Joka tapauksessa jätevesimäärä palokunnan epäonnistuessa on riittävän suuri aiheuttamaan ympäristövahinkojen kustannukset.

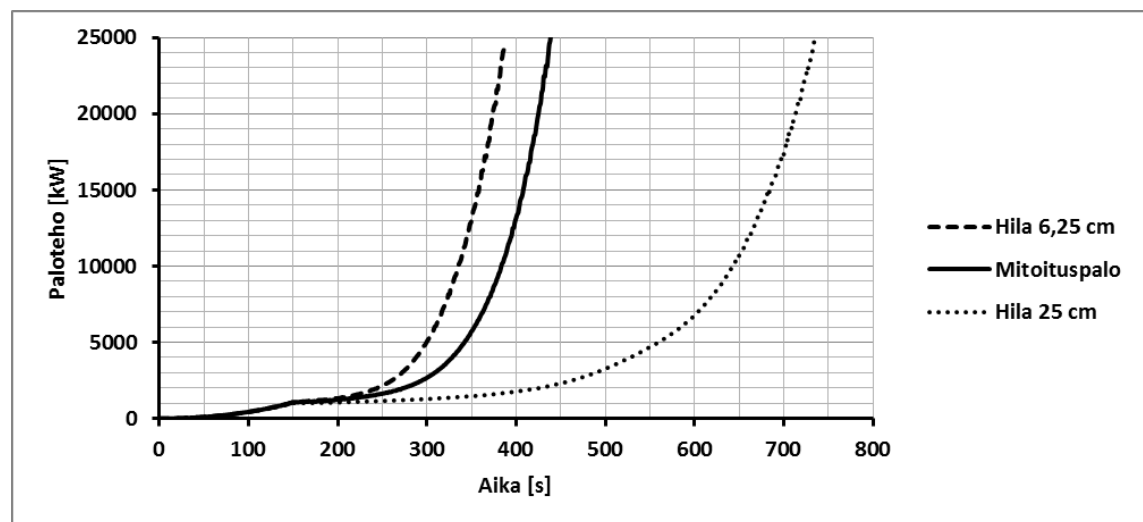
Yhteenvedona ympäristövahingoista todetaan, että palokunnan ja sprinklerin epäonnistuminen aiheutti täyden ympäristökustannuksen. Pienekkö ympäristövahinko koki palokunnan sammutustoimenpiteiden johdosta.

8.3.4 Hilakoon herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelussa katsottiin, kuinka hilakoon muutos vaikutti palonkehitykseen. Jos toiminnallinen tarkastelu olisi osana rakennuslupa-aineistoa, perusteellisempi herkkyystarkastelu simulaatioparametrien osalta olisi todennäköisesti tarpeen. Koska tähän tutkimukseen on valittu pelkästään yksi mitoituspalo ja riskitarkastelu on toteutusvaihtoehtojen välillä yhteismitallinen, tässä tutkimuksessa rajoitettiin pelkästään yksittäiseen hilatarkasteluun.

Tarkasteltavana skenaariona oli SK1B.7, jossa palon syttymisalueella hilakokona käytettiin 6,25 cm ja 25 cm. Hilakoolla 12,5 cm laskentaan kului aikaa noin viikko, kun simuloinnin annettiin jatkua yleissyttymispisteeseen saakka. Hilakoon pienentäminen kasvatti laskenta-aikaa siten, että kuuden minuutin simuloimiseen kului aikaa 10 vuorokautta. Tämän jälkeen palosimulaatio kohtasi laskentavirheen, jonka aiheutti virtauksen äkillinen muutos hilaverkkojen rajakohdassa. Simulaatiosta saatiin kuitenkin riittävät havainnot (kuva 8.11) ennen laskennan katkeamista.

Hilakoppikoon puolittamisella oli havaittavissa vaikutus tuotelavojen syttymishetkeen. Määritettäessä simulaatiomallin ominaisuuksia FDS ymmärtää syttymislämpötilaparametrin pinnan (hilakopin tahkon) ominaisuutena, ei materiaaliominaisuutena. Noin 50 sekunnin poikkeaman syttymisajoissa aiheutti pienemmän hilakopin tahkon nopeampi lämpeneminen verrattuna 12,5 cm hilakokoon, jossa lämmitettävä pinta-ala on suurempi. Päinvastainen ilmiö havaittiin, kun käytettiin 25 cm hilakoppikokoa, jolloin palonkehitys oli todella hidas.



Kuva 8.11. *Palotehokäyrät skenaariossa SK1B.7 herkkyystarkasteluiden hilakoppidimensioilla.*

Vaikka herkkyystarkastelu osoitti, että pienemmän hilakoon käyttö aiheuttaa poikkeavia tuloksia, laskelmissa käytettiin 12,5 cm hilakoppikokoa, koska laskenta-ajat kasvoivat tarpeettoman pitkiksi ja hilakoon muutos ei vaikuttanut syttymishetken jälkeiseen palonkehitykseen poikkeuksellisella tavalla. Syttymishetken vaikuttavat oleellisesti myös muut laskentamuuttujat, mm. alkupalon suuruus ja trukin etäisyys lavapinosta,

joiden pieni variointi aiheuttaisi hilatarkastelun tapaisia eroavaisuuksia. Nopeampi palonkehitys vaikutti heikentävästi palokunnan sammutushyökkäyksen onnistumisen todennäköisyyteen. Pienemmän hilakoon vaikutusta lopullisiin tuloksiin arvioitiin riskikustannusten herkkyystarkasteluiden yhteydessä.

9.1.2 SK1B: Nykyinen varastorakennus + sprinkleri

Sprinklerijärjestelmän asentaminen tiloihin pienensi vuosittaista omaisuusvahingon odotusarvoa 74 %. Rahallisen vahingon odotusarvon laskun aiheuttivat sprinklerin rajaavat tai sammuttavat skenaariot, jotka kattoivat todennäköisyyksien osalta noin 70 % kaikista skenaarioista. Näissä tapauksissa ei ollut tarvetta raskaille saneerauksille tai suurille keskeytyskustannuksille.

Sprinklereiden vaikuttaessa seurausten osalta pysyttiin ainoastaan savuvahingoissa. Palokunnan riittävän nopealla reagoinnilla savuvahingot rajoittuivat tuotevarastoon, muutoin savusaneeraus oli tarpeen myös viereisissä tiloissa. Sprinklerin epäonnistuessa seuraukset noudattelivat A-kohdan tapauksia.

Taulukko 9.2. Kustannusjakauma nykyisessä varastotilassa, kun se sprinklataan (SK1B).

SK		P	C	TV1.1	TV1.2	TV1.3	TV2.1	TV2.2	TV2.3	P1.1	P1.2	P2.1	P2.2	P2.3	V1.1	V1.2	V1.3	V2.1	V2.2	Y1
SK1B	1	9,16E-08	X			X	X	X				X	X	X			X	X	X	X
SK1B	2	0,00E+00	X	X	X	X														X
SK1B	3	5,19E-07	X			X	X	X	X			X	X	X	X	X	X			X
SK1B	4	0,00E+00	X	X	X	X														X
SK1B	5	3,91E-07	X			X	X	X	X	X	X						X	X	X	X
SK1B	6	0,00E+00	X	X	X	X														X
SK1B	7	2,21E-06	X			X	X	X	X	X	X				X	X	X			X
SK1B	8	0,00E+00	X	X	X	X														X
SK1B	9	2,93E-06	X	X	X	X				X	X				X	X	X			
SK1B	10	0,00E+00	X	X	X	X														
SK1B	11	1,66E-05	X	X	X	X				X	X									
SK1B	12	0,00E+00	X	X	X	X														
SK1B	13	1,25E-05	X	X	X	X									X	X	X			
SK1B	14	0,00E+00	X	X	X	X														
SK1B	15	7,08E-05	X	X	X	X														
SK1B	16	1,56E-06	X	X	X	X				X	X				X	X	X			
SK1B	17	0,00E+00	X	X	X	X														
SK1B	18	8,83E-06	X	X	X	X				X	X									
SK1B	19	0,00E+00	X	X	X	X														
SK1B	20	6,64E-06	X	X	X	X									X	X	X			
SK1B	21	0,00E+00	X	X	X	X														
SK1B	22	3,76E-05	X	X	X	X														
SK1B	23	3,53E-05	X			X														
SK1B	24	1,24E-06	X			X	X	X	X			X	X	X			X	X	X	X
SK1B	25	3,50E-07	X	X	X	X														X
SK1B	26	7,04E-06	X			X	X	X	X			X	X	X	X	X	X			X
SK1B	27	1,98E-06	X	X	X	X														X
SK1B	28	5,29E-06	X			X	X	X	X	X	X						X	X	X	X
SK1B	29	1,49E-06	X	X	X	X														X
SK1B	30	3,00E-05	X			X	X	X	X	X	X				X	X	X			X
SK1B	31	8,46E-06	X	X	X	X														X
SK1B	32	3,97E-05	X	X	X	X				X	X				X	X	X			
SK1B	33	1,12E-05	X	X	X	X														
SK1B	34	2,25E-04	X	X	X	X				X	X									
SK1B	35	6,35E-05	X	X	X	X														
SK1B	36	1,69E-04	X	X	X	X									X	X	X			
SK1B	37	4,78E-05	X	X	X	X														
SK1B	38	1,23E-03	X	X	X	X														
SK1B	39	2,11E-05	X	X	X	X				X	X				X	X	X			
SK1B	40	5,95E-06	X	X	X	X														
SK1B	41	1,20E-04	X	X	X	X				X	X									
SK1B	42	3,37E-05	X	X	X	X														
SK1B	43	9,00E-05	X	X	X	X									X	X	X			
SK1B	44	2,54E-05	X	X	X	X														
SK1B	45	6,54E-04	X	X	X	X														
SK1B	46	9,31E-04	X			X														
Σ	0,00392																			
R_{SK1B}			0,26		Riskisuhdeluku															
								Palovahinko					Savuvahinko			Ympäristövahinko				

9.1.3 SK2A: Erillinen varastorakennus

Erillisessä varastorakennuksessa seuraukset rajoittuivat pelkästään tuotevarastoon ja ympäristövahinkoihin. Oletuksena oli, ettei palo pysty leviämään pahimmassakaan tapauksessa viereiseen tehdaslaitokseen, jolloin pitkäkestoisia ja taloudellisesti kalliita tuotannon keskeytyksiä ei synny. Saneerauksen aikana valmiita tuotteita pystytään varastoimaan yrityksen omistamissa muissa tiloissa.

Skenaarioita jäi jäljelle enää kuusi, joiden toteutuvuus noudatteli kohdan A periaatteita. Uuden varastorakennuksen rakentaminen ilman sprinklerijärjestelmää alensi kokonaisriskin suuruutta 83 % verrattuna nykyisen varaston tapaukseen.

Taulukko 9.3. Kustannusjakauma uudessa, erillisessä varastorakennuksessa (SK2A).

SK		P	C	TV1.1	TV1.3	TV2.1	TV2.3	Y1	
SK2A	1	1,61E-04	X		X	X	X	X	
SK2A	2	0,00E+00	X	X	X			X	Palovahinko
SK2A	3	3,53E-05	X		X				Savuvahinko
SK2A	4	2,18E-03	X		X	X	X	X	Ympäristövahinko
SK2A	5	6,14E-04	X	X	X			X	
SK2A	6	9,31E-04	X		X				
	Σ	3,92E-03							
				R_{SK2A} 0,17		Riskisuhdeluku			

9.1.4 SK2B: Erillinen varastorakennus + sprinkleri

Uuden varastorakennuksen rakentaminen sprinklerijärjestelmällä varustettuna on palovahinkoriskien kannalta suotuisin ratkaisu, koska se alentaa vuosittaisia riskikustannuksia noin 86 % verrattaessa nykyiseen tilanteeseen. Myös tässä tapauksessa onnistuneiden sprinkleriskenaarioiden seuraukset rajoittuvat pelkkiin savu- ja tuotevahinkoihin. Varastorakennuksen palovahingot toteutuivat pelkästään palokunnan epäonnistuessa.

Taulukko 9.4. Kustannusjakauma erillisessä, sprinklatussa varastorakennuksessa (SK2A).

SK		P	C	TV1.1	TV1.3	TV2.1	TV2.3	Y1	
SK2B	1	3,21E-06	X		X	X	X	X	
SK2B	2	0,00E+00	X	X	X			X	Palovahinko
SK2B	3	1,03E-04	X	X	X				Savuvahinko
SK2B	4	5,46E-05	X	X	X				Ympäristövahinko
SK2B	5	3,53E-05	X		X				
SK2B	6	4,36E-05	X		X	X	X	X	
SK2B	7	1,23E-05	X	X	X			X	
SK2B	8	1,79E-03	X	X	X				
SK2B	9	9,50E-04	X	X	X				
SK2B	10	9,31E-04	X		X				
	Σ	3,92E-03							
				R_{SK2B} 0,14		Riskisuhdeluku			

9.2 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkasteluissa käsiteltiin kaksi herkkyystapausta, joiden tuloksia verrattiin alkuperäisten laskelmien tuottamiin tuloksiin eli perustapaukseen. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka laskelmien aikana havaitut poikkeamat tai oletukset vaikuttivat kokonaisriskin lopputulokseen.

9.2.1 Herkkyystarkastelu 1: Hilakoko 6,25 cm

Ensimmäisessä herkkyystapauksessa tarkasteltiin tilannetta, jossa laskelmien hilakokona käytetään puolet alkuperäisistä laskelmista. Pienemmällä syttymisalueen hilakoppi-dimensiolla havaittiin, että syttyminen tapahtui 50 sekuntia aiemmin kuin perustapauksessa. Aikaisempi syttyminen alensi palokunnan onnistumisen todennäköisyyttä, koska rajatilaolosuhteet saavutettiin lähes minuuttia aiemmin. Paloilmoittimen toimiessa palokunnan epäonnistumisen todennäköisyys laski arvosta 0,78 arvoon 0,9. Paloilmoittimen epäonnistuessa palokunnan epäonnistumisen todennäköisyys oli ennestään jo 1. Alkusammutuksen olosuhteisiin ja edelleen todennäköisyyksiin nopeammalla syttymisellä ei ollut vaikutusta. Nopeampi palonkehitys ei myöskään aiheuttanut muutoksia seurausarvioinneissa, koska paloilmoittimien ja sprinklereiden aktivoitumisajankohdat säilyivät ennallaan.

Heikentynyt palokunnan onnistumisen todennäköisyys kasvatti riskikustannuksia lievästi jokaisessa skenaariossa. Prosentuaaliset muutokset skenaariokokonaisuuksien euromääräisissä riskikustannuksissa olivat: SK1A: + 12 %; SK1B: + 4,8 %; SK2A: + 3,0 % ja SK2B: + 0,1 %. Vastaavasti vuosittainen muutos riskisuhdeluvuissa oli lähes olematon, kun arvoja verrattiin nykyisen varastotilan vuosittaiseen riskikustannukseen. Onnistumisen todennäköisyyden 12 % heikkeneminen näkyi riskisuhdeluvuissa vain noin 2 prosenttiyksikön muutoksena sprinklerijärjestelmän tai erillisen varastorakennuksen rakentamisen eduksi. Herkkyystarkasteluiden summat ja riskisuhdeluvut ovat esitetty kuvassa 9.1.

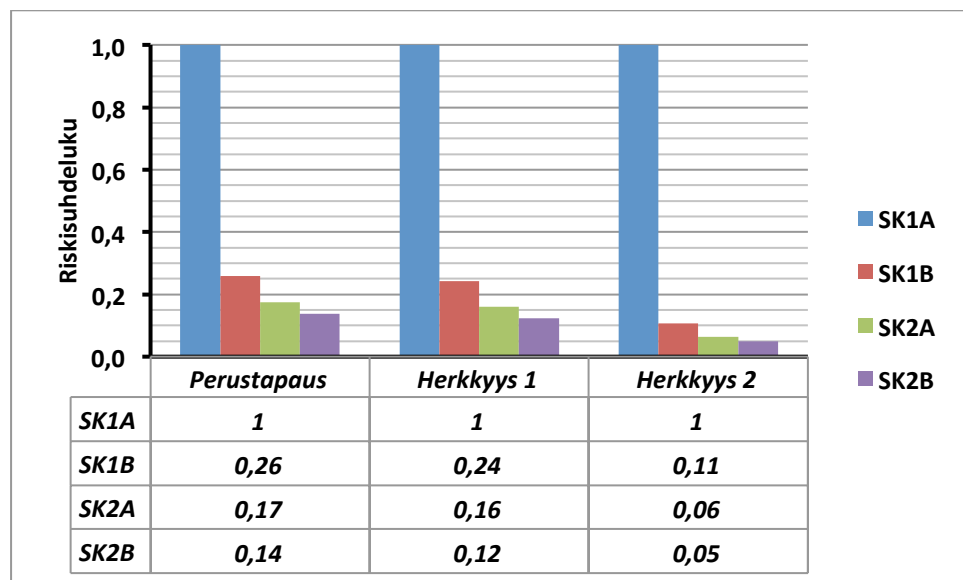
9.2.2 Herkkyystarkastelu 2: Poikkeava palovahinkoseuraus

Tarkastelujen yhteydessä havaittiin palovahinkojen keskeytyskustannusten osuuden olevan kaikista kustannuksista erittäin merkittävä. Toisena herkkyystarkasteluna käsiteltiin tapaus, jossa oletettiin viereisten tilojen kärsivän raskaista saneerauksista myös niissä tapauksissa, joissa palokunta epäonnistuu ja palo-osastointi onnistuu (+ sprinkleri epäonnistuu). Aikaisemmin tarkastelun yhteydessä arvioitiin, että näissä skenaarioissa seuraukset rajoittuivat pelkästään savuvahingoiksi.

Herkkyystarkastelun muutoksella oli todella merkittävä vaikutus nykyisen varastotilan vuotuisen riskiin, sillä kokonaisriskin suuruus kasvoi 175 %. Koska savusaneerauksen ja palosaneerauksen sekä näiden keskeytysvahinkojen välinen kustannusero on karkeasti noin kymmenkertainen, jolloin vaikutus näkyi välittömästi tulosten suuruudessa. Sprinklerijärjestelmän sisältävässä skenaariokokonaisuudessa SK1B vuotuinen riski

kohosi vain hieman eli noin 13 %, koska skenaarioita oli vaihtoehtoon A verrattuna paljon enemmän, jolloin yhden skenaarion todennäköisyys ja vaikutus tulokseen on merkittävästi vähäisempi. Erillisen varastorakennuksen tapauksiin seurausvaikutuksen muutoksella ei ollut merkitystä, koska varastopalon sattuessa palouhka ei ulotu pääraKENnukseen. Kokonaisuuden A kohonnut vuotuinen riski näkyi riskisuhdeluvuissa merkittävänä muutoksena parannustoimenpiteiden eduksi, sillä vuotuisen rahallisen vahingon odotusarvon alenema skenaariokokonaisuuksissa SK1B - SK2B oli 0,11/0,06/0,05.

Kuvassa 9.1 on esitetty perustapauksen ja herkkyystarkasteluiden tulokset riskisuhdelukujen avulla. Jokaisen tarkastelun tuloksissa skenaariokokonaisuuden 1A riskisuhdeluvuksi on merkitty 1, vaikka absoluuttisen palovahinkoriskin suuruus [€/palo] vaihtelee herkkyystarkasteluissa. Oleellista on kuitenkin verrata skenaariokokonaisuuksien välisiä tuloksia keskenään, kuinka parannustoimenpide vaikuttaa lopulliseen rahallisen vahingon odotusarvoon.



Kuva 9.1. Riskisuhdeluvut perustapauksessa ja herkkyystarkasteluissa.

Herkkyystarkastelut korostivat entisestään nykyisen varastotilan ja vaihtoehtoisten ratkaisujen välistä vahingon odotusarvon eroa. Herkkyysanalyysistä havaittiin, että todennäköisyys- tai seurausparametrin muutos voi vaikuttaa merkittävästi yksittäiseen vuotuisen omaisuusvahinkoriskin arvoon, mutta vertailevana, yhteismitallisena tarkasteluna eri vaihtoehtojen väliset riskisuhdeluvut säilyvät samassa suuruusluokassa.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

10.1 Riskitarkastelun tulokset

Vertailevan riskitarkastelun tulokset osoittivat, että parannustoimenpiteillä oli merkittävästi alentava vaikutus vuosittaisen riskin odotusarvoon. Laskelmien mukaan sprinklerijärjestelmän asentaminen nykyiseen tilaan pienensi rahallisen vahingon odotusarvoa 74 %. Tässä yhteydessä pelkkien riskisuhdelukujen perusteella toimenpidesuosituksia ei pystytä antamaan, mutta vuosittaisen riskikustannuksen alenemaa ja sprinklerijärjestelmän asentamiskustannuksia on syytä vertailla keskenään. Tehdyt herkkyystarkastelut puoltavat myös perustapauksesta saatuja johtopäätöksiä.

Varastotilan erottaminen tai erottaminen ja sprinklerijärjestelmän asentaminen eivät riskisuhdelukujen perusteella välttämättä ole kannattava ratkaisu, vaikka riski näissä skenaariokokonaisuuksissa oli kaikkein pienin. Prosentuaaliset erot nykyiseen tilanteeseen verrattuna olivat 83 % ja 86 %, mutta vuosittainen ero nykyiseen varastorakennukseen sprinklerijärjestelmällä varustettuna oli verrattain pieni. Uuden varaston rakentamiskustannukset kohoavat helposti varsin suureksi verrattuna tehdastilojen jäljellä olevaan elinkaareen ja kokonaispaloriskiin.

Riskitarkastelun tapauskohtaisuudesta riippuen täysin uuden tehdastilan suunnittelussa ajatusmalli erillisestä varastotilasta sen sijaan voisi olla mahdollinen. Nykyisin pakatut tuotteet liikkuvat liukuhihnoja pitkin palo-osastoivassa seinässä olevien luukkujen läpi varastoon. Erillisen varaston ja pakkaamotilan välisen kuljetuksen voisi hoitaa liukuhihnalla varustettua palo-osastoitua kuljetuskäytävää pitkin, jossa käytävän molemmissa päissä olisi käytön mukaan avautuvat palo-osastoidut luukut. Toteutus ei välttämättä olisi kovin monimutkainen, jolloin todennäköisesti ehkäistään tehdasrakennuksen täydellisen palovahingon skenaario. Vaikutus on tietenkin myös käänteinen eli pakkaamotilojen palossa varastotilan valmiit tuotteet eivät ole uhattuina.

Edellä esitetyt toimenpiteet ovat kustannuksiltaan merkittäviä, joiden toteutus vaatii tilaajalta tarkempia investointilaskelmia. Kevyempiä ratkaisuja mietittäessä paloriskiä on mahdollista alentaa pienentämällä palon todennäköisyyttä (syttyminen ja kehitys) tai minimoimalla seurauksia. Lähestymistapana voidaan käyttää esimerkiksi taulukon 2.7 keinoja. Syttymisen uhka on aina olemassa, mutta käytännön esimerkkinä trukkien lataus ja pahvimurskaimen käyttö varastossa lisäävät syttymisriskiä oleellisesti, jolloin niiden sijoittelua on syytä tarkastella uudelleen. Lisäksi varaston kattavammalla alkusammutusvarustelulla ja työntekijöiden sammutustaidon ylläpidolla palonkehitys pystytään rajaamaan todennäköisemmin jo alkusammutusvaiheeseen. Palon laajetessa keinot paloriskin alentamiseksi ilman järeitä toimenpiteitä ovat varsin rajalliset.

10.2 Menetelmän käyttökelpoisuus

Tässä työssä kuvattu toimintatapa osoittautui käytännölliseksi menetelmäksi vertailla kvantitatiivisesti tilakohtaisia paloriskejä. Menetelmä soveltuu käytettäväksi tapauksiin, joissa ongelma on tarkkaan rajattu ja kohteen lähtötiedot ovat riittävän hyvin selvillä. Tulosten perusteella riskitarkastelu tarjoaa oivan työkalun arvioida turvallisuustoimintojen vaikutusta kokonaispaloturvallisuustasoon. Tässä tutkimuksessa tarkastelun kohteena oli lähinnä automaattisen sammutusjärjestelmän vaikutus omaisuusvahinkoihin, mutta menetelmän soveltaminen esimerkiksi savunpoistoratkaisuihin (manuaalinen/automaattinen) henkilö- ja omaisuusvahingoissa toimisi käytännössä samalla tavoin. Riskitarkastelusta saadaan eniten irti vertailevana analyysina, jolloin lähtöarvojen epävarmuudella ei ole niin suurta vaikutusta tuloksiin skenaariokokonaisuuksien yhteismitallisessa tarkastelussa. Yksittäisenä rahallisen vahingon odotusarvona menetelmää on syytä käyttää äärimäisen varoen, koska oletuksia ja epävarmuustekijöitä on paljon. Täten riskitarkastelun numeerista lopputulosta ei saa koskaan käsittää ehdottomana totuutena, vaan ennemminkin oikeaa suuruusluokkaa suuntaa antavana tietona.

Tutkimuksen aikana havaittiin riskin arvioinnissa vaadittavan todella paljon lukuarvoja, joiden valinnassa tarvitaan työn tekijän omaa kokemusta, vastaavaa muuta tutkimusta tai tilastotietoa. Järjestelmien vikaantumistarkastelut pysytään selvittämään varsin luotettavasti, koska tilastollista tietoa on saatavissa paljon. Tarvittaessa vikapuun ositus pieniinkin komponentteihin on mahdollista, mutta käytetyt luotettavuudet absoluuttisina arvoina olivat tähän tarkasteluun riittävät. Eniten ongelmia aiheuttivat ihmisistä riippuvat toimet eli alkusammutus ja palokunta, koska näiden toiminnan kestoon vaikuttavat monet psykologiset tekijät. Nykyistä monipuolisemmalla todennäköisyysjakaumien käytöllä tulokset kattaisivat suuremman joukon epävarmuustekijöitä. Suhteellisten riskien herkkyystarkastelusta kuitenkin havaittiin, että yhden todennäköisyyskomponentin lievällä muutoksella tässä tutkimuksessa ei ollut suurtakaan merkitystä lopulliseen tulokseen.

Toiminnalliselle tarkastelulle tyypillisesti mitoituspaloilla oli keskeinen rooli saatun lopputulokseen arvioitaessa seurauskustannusten toteutumista. Kattavammissa paloriskitarkastelussa tulisi ottaa huomioon myös muut syttymislähteet kuin sähkötrukki ja tarkastella eri syttymisen sijainteja muuttuvien palonkehityksin. Tämä tarkastelu rajoitui pelkästään yhteen varaston syttymistilanteeseen, josta vakava palo pääsee kehittymään. Tarkoituksena oli havainnollistaa menetelmän käyttöä, joten syvällisempi tarkastelu ei ollut tarpeen. Tutkimuksen rajaaminen on oleellista, koska pelkästään jo yksittäisellä mitoituspaloilla työn tekeminen vaati paljon työtä ja perehtyneisyyttä asiaan, koska kaikki lukuarvot on määritettävä ja perusteltava erikseen. Riskitarkastelun syvällisempi käsittely ei välttämättä tuo tarkastelulle yhtään lisäarvoa kulutettuun aikaan nähden.

Kustannusjako savu-, palo- ja ympäristövahinkoihin oli onnistunut, koska näille pystyttiin arvioimaan järkevästi seurauskustannus. Työn onnistumisen kannalta toimiva ryhmittely oli olennainen asia, jotta tilaajan oli ”helppo” arvioida kustannus eri osioissa. Tarkastelun suurin ongelma oli määrittää ja perustella seurauskustannuksen toteutumi-

nen/toteutumattomuus simuloitussa skenaariossa. Savuvahinkojen arviointi oli seurauskustannusluokista yksinkertaisin, koska vaurioita pystyttiin tarkastelemaan sekä visuaalisesti että mittausdata avulla. Tosin palokunnan toiminta savunpoistoluukkujen osalta monimutkaisti tapahtumien tarkastelua.

Raskaiden saneerausten kustannusvaikutus aiheutti eniten mietittävää, koska palo-osastoivien rakenteiden kestävyyttä palokunnan toimiessa on vaikea arvioida. Palovahinkojen toteutumisen kattavammassa tarkastelussa rakenteelliset lämpörasitusanalyysit olisivat tarpeen. Esimerkiksi puhtaissa teräsrakenteissa rakenteiden palonkestoa voidaan arvioida vielä varsin vähäisellä vaivalla, mutta tarkastelun kaltainen jännitetty teräsbetonirakenne on jo erittäin vaativa rakenteellisena lämpötarkasteluna, johon tarvitaan FEM -laskentaa. Tilannetta monimutkaisti vielä tilan yleissytytymisen, jonka jälkeistä palon lämpötilan kehitystä on haastavaa simuloida.

Tässä tutkimuksessa esitetty toimintatapa ei missään nimessä ole ainoa oikea keino suorittaa vertailevaa riskianalyttistä tarkastelua, kunhan käytettävät laskentamenetelmät ovat vain yleisesti hyväksytyjä. Tutkimuksen tavoitteina oli tuoda esille toiminnallisen palomitoituksen kulkua ja soveltaa esitettyjä menetelmiä esimerkkitapaukseen vertailevassa riskitarkastelussa. Lopputulos oli mielestäni onnistunut, sillä omaisuusvahinkoriskin suuruus yksittäin ja vertailutulokset olivat järkeviä. Menetelmien ja laskentaohjelmien kehittyessä eteenpäin riskinarvioinneista saadaan toivottavasti entistä kattavampia tuloksia, jolloin sen käyttö yleistyisi paloteknisessä suunnittelussa. Riskitarkastelut ovat kuitenkin aina toiminnallisia kohdekohtaisia tapauksia, joten yksittäisen tarkastelun tuloksia ei saa yleistää pätemään muihin samankaltaisiin tapauksiin.

LÄHTEET

- ABS, 2010.** Guidance Notes on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety. American Bureau of Shipping. Houston, USA. January 2004 (Updated July 2010). 95 p.
- Alvarez, A., Meacham B.J., Dembsey, N.A. & Thomas, J.R., 2013.** Twenty years of performance-based fire protection design: challenges faced and a look ahead. *Journal of Fire Protection Engineering* 2013 23:249. pp. 249 – 276
- Babrauskas, V., 2003.** Ignition Handbook: Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management and Forensic Science. Fire Science Publishers, USA. 1116 p.
- Bilger, R.W., 1995.** Computational Field Models in Fire Research and Engineering. *Fire Safety Science – Proceedings of the fourth international symposium*. pp. 95 – 110.
- Bryan, J.L., 2008.** Behavioral Response to Fire and Smoke. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition*. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp.3-320 – 3-354
- Bukowski, R.W., Budnick, E.K. & Schemel, C.F., 2002.** Estimates of the Operational Reliability of Fire Protection Systems. *Fire Protection Strategies for 21st Century Building and Fire Codes Symposium. Proceedings*. Society of Fire Protection Engineers and American Institute of Architects. September 17-18, 2002, Baltimore, MD, pp. 111-124
- Carlsson, J., 1999.** Fire Modelling Using CFD – An introduction for Fire Safety Engineers. Report 5025. Lund University, Sweden. 120 p.
- CEA 4001: 2007 – 06 (fi).** Sprinklerilaitteistot – Suunnittelu ja asentaminen. Omaisuuksvahinkokomitea, Vahingontorjuntavaatimukset. Euroopan vakuutus- ja jälleenvakuutusalan keskusliitto. 193 s.
- Clemens, P.L., 1993.** Fault Tree Analysis. 4th Edition. Sverdrup. Luettavissa: <http://www.fault-tree.net/> (26.5.2014)
- Cox, G. & Kumar, S., 2002.** Modeling Enclosure Fires Using CFD. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3th Edition*. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2002. pp.3-194 – 3-218.

- Drysdale, D., 2000.** An Introduction to Fire Dynamics 2nd Edition. Wiley. United Kingdom. 451 p.
- ELMAS, 2011.** ELMAS 4 – Käyttöohje, versio 4.4. Ramentor Oy. 272 s. Kotisivut: <http://www.ramentor.com/etusivu/tuotteet/elmas/> (viitattu 12.3.2014)
- EN 1991-1-2+AC, 2002.** Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Suomen standardoimisliitto SFS. Helsinki 2002, korjaus AC:2013. 102 s.
- EN 1992-1-2+AC, 2008.** Eurokoodi 2; Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Suomen standardoimisliitto SFS. Helsinki 2004, korjaus AC:2008. 90 s.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU 305/2011).** Euroopan Unioni. Voimaantulo 01.07.2013. Luettavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:EN:PDF>. (Viitattu 5.3.2014)
- Gwynne, S.M.V & Rosenbaum, E.R., 2008.** Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp. 3-373 – 3-396
- Hadjisophocleous, G.V. & Bênichou, N., 2000.** Development of performance-based codes, performance criteria and fire safety engineering methods. NRCC – 43976. National Research Council Canada. 32 p.
- Hadjisophocleous, G.V. & Mehaffey, J.R., 2008.** Fire Scenarios. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp. 5-186 – 5-205
- Heikkilä, A-M., Malmën, Y., & Maskuniitty, M., 2002.** Moduuli 2, Kvantitatiivinen riskianalyysi. Aineisto laitoksen elinkaaren riskianalyysi- ja prosessiturvallisuuskoulutukseen (ALARP). Raportti n:o BTUO44-021091. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tampere 2002. 53 s. Luettavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/alarp/aineisto/harj-08-moduuli-02.pdf>
- Heinisuo, M. & Partanen, M., 2013.** Modeling of Car Fires with Sprinklers. Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering. Structural Engineering. Research Report 161. 59 s. + liit. 11 s.

- Hietaniemi, J., Baroudi, D., Korhonen, T., Björkman, J., Kokkala, M., & Lappi, E., 2002.** Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen – Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. VTT Tiedotteita 2123. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 95 s. + liit. 51 s.
- Hietaniemi, J., 2005a.** Probabilistic simulation of glass fracture and fallout in fire. VTT Working Papers 41. VTT Building and Transport. Espoo. 88 p. + liit. 34 p.
- Hietaniemi, J., 2005b.** Rakenteiden toiminta tulipalossa – opas paloteknisen suunnittelun tueksi. VTT Working Papers. Espoo 2005 (päivitetty 6.5.2007). 162 s.
- Hietaniemi, J. & Rinne, T., 2007a.** Historiallisesti arvokkaan kohteen toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu – Esimerkkitapauksena Porvoon museo. VTT Working Papers 71. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 2007. 136 s. + liit. 44 s.
- Hietaniemi, J., 2007b.** Toiminnallinen palotekninen suunnittelu ja suunnitelmien tarkastaminen: Näkökulmia ja ohjeita. 2. versio, päivitetty 10.9.2007. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 62 s. + liit. 2 s.
- Houlding, R.C. & Rew, P.J., 2003.** Assessment of benefits of fire compartmentation in chemical warehouses. Research Report 152. WS Atkins Consultants Ltd, Norwich. 55 p.
- Hurley, M.J. & Rosenbaum, E.R., 2008.** Performance-Based Design. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp. 3-440 – 3 – 455
- INSTA/pr TS 950, 2012.** Fire Safety Engineering – Verification of fire safety design in buildings. Enquiry draft (03.12.2012). Inter Nordic Standardisation Cooperation. Sweden. 43 p.
- Jahn, W., Rein, J. & Torero, J.L., 2011.** A posteriori modeling of the growth phase of Dalmarnock Fire Test One. School of Engineering, University of Edinburgh, Scotland. Building and Environment Volume 46, Issue 5, pp. 1065 – 1073.
- Joglar, F., 2008.** Reliability, Availability and Maintainability. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp.5-25 – 5-68

- Karlsson, B. & Quintiere, J.G., 2000.** Enclosure Fire Dynamics. CRC Press LLC. Boca Raton, Florida. 315 p.
- Kokkala, M., 2000.** Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu – Toiminnallinen lähestymistapa. VTT tiedote 2028. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo. 63 s. + liit. 15 s.
- Korhonen, T. & Hostikka, S., 2009.** Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS + Evac – Technical Reference and User’s Guide. VTT Working Papers 119. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Espoo 2009. 91 p.
- Korhonen, T., 2012.** Kurssi: Rak-43.3520 “Tulipalon simulointi”. Luentomateriaali. Aalto -yliopisto.
- Kuligowski, E.D. & Peacock, R.D., 2005.** A Review of Building Evacuation Models. Technical Note 1471. National Institute of Standards and Technology, NIST. Washington, USA. 30 p. + app. 118 p.
- Lehtinen, K. & Rasmus, T., 2011.** Tavaratalon sortumiseen johtanut tulipalo Vantaalla 23.12.2010. Tutkintaselostus D8/2010Y. Onnettomuustutkintakeskus. 24 s.
- Maankäyttö- ja rakennusasetus 895/1999.** Ympäristöministeriö. Voimaantulo 01.01.2000. Luettavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990895> (viitattu 25.2.2014)
- Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999.** Ympäristöministeriö. Voimaantulo 01.01.2000. Luettavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132> (viitattu 25.2.2014)
- McCaffrey, B.J., 1979.** Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results. NBSIR 79-1910 Final Report. Center for Fire Research National Engineering Laboratory, Washington, D.C. 52 p.
- McGrattan, K.B., Baum, H.R. & Rehm, R.G., 1998.** Large Eddy Simulations of Smoke Movement. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, USA. Fire Safety Journal 30. pp. 161 - 178
- McGrattan, K. & Miles, S., 2008.** Modeling Enclosure Fires Using Computational Fluid Dynamics. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp. 3-229 – 3-246

- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W. & McDermott, R., 2010**, Fire Dynamics Simulator, Technical reference guide. National Institute of Standards and Technology, version 5.5, USA
- Meacham, B.J., 1996**. The Evolution of Performance-Based Codes & Fire Safety Design Methods. Society of Fire Protection Engineers. Boston, MA. 87 p.
- Meacham, B.J., Charters, D., Johnson, P. & Salisbury, M., 2008**. Building Risk Analysis. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp. 5-206 – 5-236
- Nelson, H.E. & Mowrer, F.W., 2002**. Emergency Movement. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2002. pp. 3-367 – 3-380
- Notarianni, K.A & Parry, G.W., 2008**. Uncertainty. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp. 5-69 – 5-100
- Nystedt, F., 2011**. Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings. Lund University, Sweden. Report 3150. 140 p.
- Nystedt, F., 2012**. Case Studies on the Verification of Fire Safety Design in Sprinklered Buildings. Lund University, Sweden. Report 7035. 80 p.
- Olenick, S.M. & Carpenter D.J., 2003**. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. Journal of Fire Protection Engineering 2003 13:87. DOI: 10.1177/1042391503013002001. 24 p.
- NFPA 101, 2012**. Life Safety Code, 2012 Edition. National Fire Protection Association. Quincy, MA.
- NFPA 204M, 1985**. Guide for Smoke and Heat Venting, National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- Paloposki, T., Tillander, K., Virolainen, K., Nissilä, M. & Survo, K., 2005**. Sammutusjätevedet ja ympäristö. VTT Working Papers 40. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka/ VTT Tuotteet ja tuotanto/ Pelastusopisto. 75 s.+ liit. 10 s.

- Palukka, P., 2014.** Riskianalyysi. Kurssin TTA-85030 ”Luotettavuus- ja riskianalyysi” kurssimateriaali. Tuotantotalouden ja rakentamisen tiedekunta. Tampereen teknillinen yliopisto. 48 s.
- Pelastuslaki 379/2011.** Sisäasiainministeriö. Voimaantulo 01.07.2011. Luettavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110379>
- Pelastustoimi, 2014.** Pelastustoimen taskutilasto 2009 - 2013. Pelastusopiston julkaisu, D-sarja: 1/2014. prontonet.fi. 33 s.
- Phillips, W.G.B., Beller, D.K., Fahy, R.F., 2002.** Computer Simulation for Fire Protection Engineering. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2002. pp. 5-112 – 5-124.
- Proulx, G., 2008.** Evacuation time. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp. 3-355 – 3-372.
- RIL 221 -2003,** Paloturvallisuussuunnittelu – Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu ja ratkaisuesimerkit. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki 2003. 138 s.
- Ruukki, 2008.** Rakenteiden toiminnallinen palomitoitus. Suunnitteluohje. Ruukki Oyj. 12 s.
- SFPE Engineering, 2007.** SFPE Engineering Guide to Performance - Based Fire Protection, 2nd Edition. National Fire Protection Association, Inc. Quincy 2007. 207 p.
- Staffanson, L., 2010.** Selecting Design Fires. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety. Lund University, Sweden. Report 7032. 105 p.
- Suomen Rakentamismääräyskokoelma A4, 2000.** Rakennuksen käyttö- ja huolto-ohje. Määräykset ja ohjeet 2000. Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto. 7 s.
- Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1, 2011.** Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 43 s.

- Tillander, K., Oksanen, T. & Kokki, E., 2009.** Paloriskin arvioinnin tilastopohjaiset tiedot. VTT tiedotteita 2479. VTT & Pelastusopisto. 106 s. + liit. 5 s.
- Tsui, A. & Spearpoint, M.J., 2010.** Variability of sprinkler response time index and conduction factor using the plunge test. *Building Service Engineering Research and Technology*. 31,2 (2010) pp. 163–176
- Tukes 2013.** Tuotantolaitosten sijoittaminen - opas. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes. Helsinki. ISBN 978-952-5649-17-8. Luettavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/vaaralliset_aineet/esitteet_ja_opaat/Tuotantolaitosten_sijoittaminen_tukesopas.pdf
- Walton, W.D, Carpenter, D.J. & Wood, C.B, 2008a.** Zone Computer Fire Models for Enclosures. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp.3-222 – 3-228
- Walton, W.D & Thomas, P.H., 2008b.** Estimating Temperatures in Compartment fires. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 2008. pp.3-222 – 3-228
- Weckman, H., 2005.** Henkilöturvallisuuden kehittäminen maanalaisissa tiloissa paloriskejä pienentämällä – Tehtävä B: Poistumisturvallisuus. VTT tiedotteita 2319. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo 2005. 93 s. + liit. 13 s.
- Yii, E.H., Fleischmann, C.M. & Buchanan, A.H., 2007.** Vent Flows in Fire Compartments with Large Openings. *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 17 -August 2007. p.211 - 237
- YO39, 2003.** Ympäristöopas 39. 2003. Rakennusten Paloturvallisuus & Paloturvallisuus korjausrakentamisessa Ympäristöministeriö, Helsinki. 166 s.
- YO103, 2003.** Ympäristöopas 103. 2003. Monitoimihallin paloturvallisuus. Ympäristö- ja Opetusministeriö, Helsinki. 114 s.
- Yucel, K.T., Basyigit, C. and Ozel, C., 2004.** Thermal Insulation Properties of Expanded Polystyrene as Construction and Insulating Materials. NIST, 13 p.
- Yung, D., 2008.** Principles of Fire Risk Assessment in Buildings. John Wiley & Sons Ltd 2008. 227 p.

Liite 1: Skenaariokokonaisuuksien tapahtumapuut

SK1A: Nykyinen varastotila

Syttyminen	Paloilmoitin	Ensisammutus	Palo-osastointi tuotantoon	Palo-osastointi varastoon	Palokunta	SK	P
0,00392	0,05	0,82	0,19	0,15	1	SK1A 1	4,58E-06
0,00392	0,05	0,82	0,19	0,15	0	SK1A 2	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,19	0,85	1	SK1A 3	2,60E-05
0,00392	0,05	0,82	0,19	0,85	0	SK1A 4	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,81	0,15	1	SK1A 5	1,95E-05
0,00392	0,05	0,82	0,81	0,15	0	SK1A 6	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,81	0,85	1	SK1A 7	1,11E-04
0,00392	0,05	0,82	0,81	0,85	0	SK1A 8	0,00E+00
0,00392	0,05	0,18				SK1A 9	3,53E-05
0,00392	0,95	0,75	0,19	0,15	0,78	SK1A 10	6,21E-05
0,00392	0,95	0,75	0,19	0,15	0,22	SK1A 11	1,75E-05
0,00392	0,95	0,75	0,19	0,85	0,78	SK1A 12	3,52E-04
0,00392	0,95	0,75	0,19	0,85	0,22	SK1A 13	9,92E-05
0,00392	0,95	0,75	0,81	0,15	0,78	SK1A 14	2,65E-04
0,00392	0,95	0,75	0,81	0,15	0,22	SK1A 15	7,47E-05
0,00392	0,95	0,75	0,81	0,85	0,78	SK1A 16	1,50E-03
0,00392	0,95	0,75	0,81	0,85	0,22	SK1A 17	4,23E-04
0,00392	0,95	0,25				SK1A 18	9,31E-04

SK1B: Nykyinen varastotila + sprinklerijärjestelmä

Syttyminen	Paloilmoitin	Ensisammutus	Sprinkleri	Palo-osastointi tuotantoon	Palo-osastointi varastoon	Palokunta	SK	P
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,19	0,15	1	SK1B 1	9,16E-08
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,19	0,15	0	SK1B 2	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,19	0,85	1	SK1B 3	5,19E-07
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,19	0,85	0	SK1B 4	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,81	0,15	1	SK1B 5	3,91E-07
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,81	0,15	0	SK1B 6	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,81	0,85	1	SK1B 7	2,21E-06
0,00392	0,05	0,82	0,02	0,81	0,85	0	SK1B 8	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,64	0,19	0,15	1	SK1B 9	2,93E-06
0,00392	0,05	0,82	0,64	0,19	0,15	0	SK1B 10	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,64	0,19	0,85	1	SK1B 11	1,66E-05
0,00392	0,05	0,82	0,64	0,19	0,85	0	SK1B 12	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,64	0,81	0,15	1	SK1B 13	1,25E-05
0,00392	0,05	0,82	0,64	0,81	0,15	0	SK1B 14	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,64	0,81	0,85		SK1B 15	7,08E-05
0,00392	0,05	0,82	0,34	0,19	0,15	1	SK1B 16	1,56E-06
0,00392	0,05	0,82	0,34	0,19	0,15	0	SK1B 17	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,34	0,19	0,85	1	SK1B 18	8,83E-06
0,00392	0,05	0,82	0,34	0,19	0,85	0	SK1B 19	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,34	0,81	0,15	1	SK1B 20	6,64E-06
0,00392	0,05	0,82	0,34	0,81	0,15	0	SK1B 21	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,34	0,81	0,85		SK1B 22	3,76E-05
0,00392	0,05	0,18					SK1B 23	3,53E-05
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,19	0,15	0,78	SK1B 24	1,24E-06
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,19	0,15	0,22	SK1B 25	3,50E-07
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,19	0,85	0,78	SK1B 26	7,04E-06
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,19	0,85	0,22	SK1B 27	1,98E-06
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,81	0,15	0,78	SK1B 28	5,29E-06
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,81	0,15	0,22	SK1B 29	1,49E-06
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,81	0,85	0,78	SK1B 30	3,00E-05
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,81	0,85	0,22	SK1B 31	8,46E-06
0,00392	0,95	0,75	0,64	0,19	0,15	0,78	SK1B 32	3,97E-05
0,00392	0,95	0,75	0,64	0,19	0,15	0,22	SK1B 33	1,12E-05
0,00392	0,95	0,75	0,64	0,19	0,85	0,78	SK1B 34	2,25E-04
0,00392	0,95	0,75	0,64	0,19	0,85	0,22	SK1B 35	6,35E-05
0,00392	0,95	0,75	0,64	0,81	0,15	0,78	SK1B 36	1,69E-04
0,00392	0,95	0,75	0,64	0,81	0,15	0,22	SK1B 37	4,78E-05
0,00392	0,95	0,75	0,64	0,81	0,85		SK1B 38	1,23E-03
0,00392	0,95	0,75	0,34	0,19	0,15	0,78	SK1B 39	2,11E-05
0,00392	0,95	0,75	0,34	0,19	0,15	0,22	SK1B 40	5,95E-06
0,00392	0,95	0,75	0,34	0,19	0,85	0,78	SK1B 41	1,20E-04
0,00392	0,95	0,75	0,34	0,19	0,85	0,22	SK1B 42	3,37E-05
0,00392	0,95	0,75	0,34	0,81	0,15	0,78	SK1B 43	9,00E-05
0,00392	0,95	0,75	0,34	0,81	0,15	0,22	SK1B 44	2,54E-05
0,00392	0,95	0,75	0,34	0,81	0,85		SK1B 45	6,54E-04
0,00392	0,95	0,25					SK1B 46	9,31E-04

Sprinklerin rajauksen/onnistumisen sisältävissä skenaarioissa palokunta onnistui aina sammuttamaan palon. Todennäköisyys palokunnan sarakkeessa tarkoittaa palokunnan todennäköisyyttä ehtiä avata savunpoistoluukut ajoissa, ettei viereisille tiloille aiheudu savuvaurioita.

SK2A: Erillinen varastorakennus

Syttyminen	Paloilmoitin	Ensisammutus	Palokunta	SK		P
0,00392	0,05	0,82	1	SK2A	1	1,61E-04
0,00392	0,05	0,82	0	SK2A	2	0,00E+00
0,00392	0,05	0,18		SK2A	3	3,53E-05
0,00392	0,95	0,75	0,78	SK2A	4	2,18E-03
0,00392	0,95	0,75	0,22	SK2A	5	6,14E-04
0,00392	0,95	0,25		SK2A	6	9,31E-04

SK2B: Erillinen varastorakennus + sprinklerijärjestelmä

Syttyminen	Paloilmoitin	Ensisammutus	Sprinkleri	Palokunta	SK		P
0,00392	0,05	0,82	0,02	1	SK2B	1	3,21E-06
0,00392	0,05	0,82	0,02	0	SK2B	2	0,00E+00
0,00392	0,05	0,82	0,64		SK2B	3	1,03E-04
0,00392	0,05	0,82	0,34		SK2B	4	5,46E-05
0,00392	0,05	0,18			SK2B	5	3,53E-05
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,78	SK2B	6	4,36E-05
0,00392	0,95	0,75	0,02	0,22	SK2B	7	1,23E-05
0,00392	0,95	0,75	0,64		SK2B	8	1,79E-03
0,00392	0,95	0,75	0,34		SK2B	9	9,50E-04
0,00392	0,95	0,25			SK2B	10	9,31E-04